

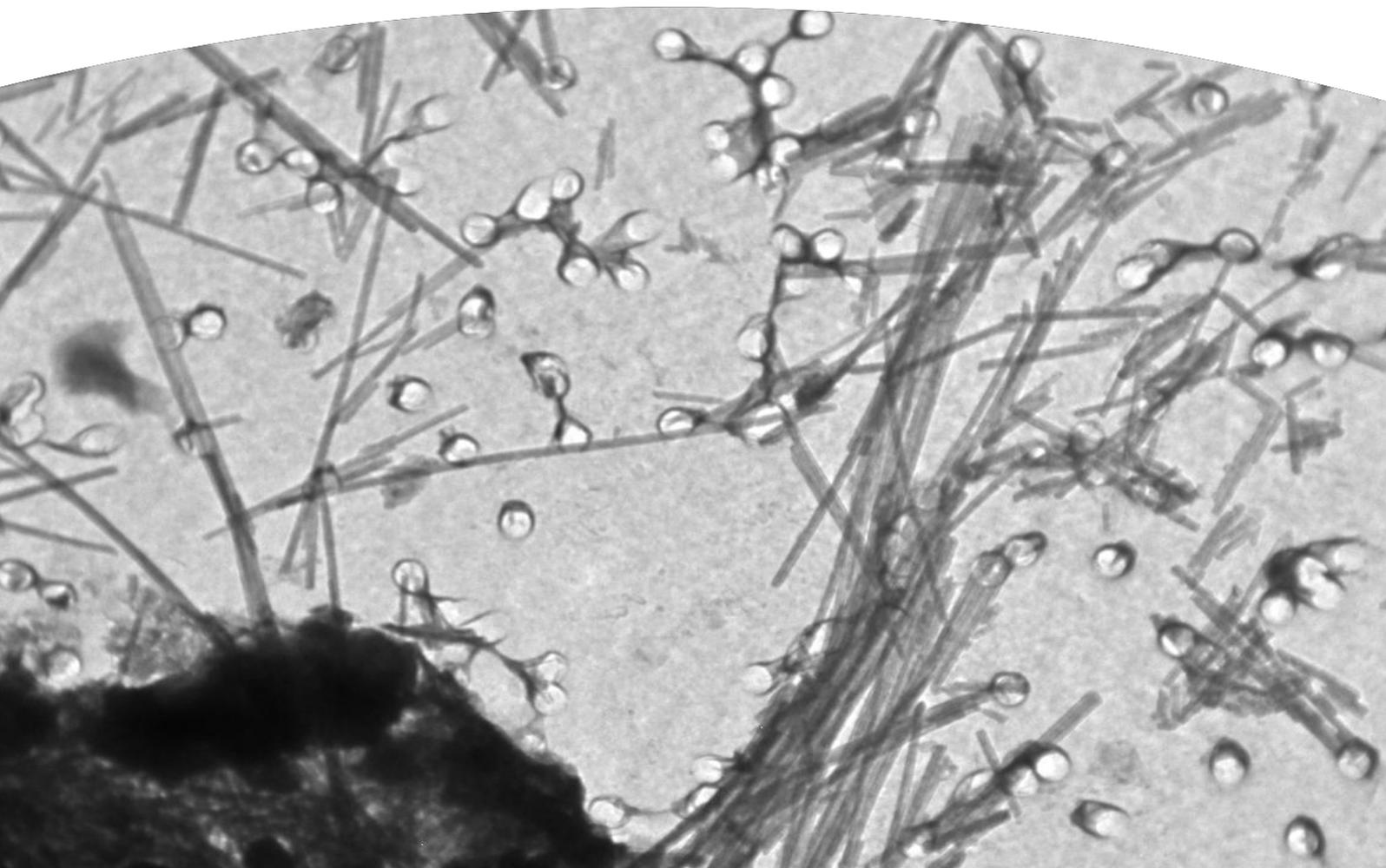


anses

# Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel

Avis de l'Anses  
Rapport d'expertise collective

Juin 2024





Le directeur général

Maisons-Alfort, le 3 juin 2024

**AVIS**  
**de l'Agence nationale de sécurité sanitaire**  
**de l'alimentation, de l'environnement et du travail**  
**relatif aux « Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel »**

---

*L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.*  
*L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.*  
*Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.*  
*Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).*  
*Ses avis sont publiés sur son site internet.*

---

L'Anses a été saisie le 23 novembre 2022 par la Direction Générale du Travail (DGT) pour la réalisation de l'expertise suivante : dangerosité, émissivité et métrologie des fibres courtes d'amiante en milieu professionnel (2022-SA-0223).

## 1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'Anses a été saisie en novembre 2022 par la Direction Générale du Travail (DGT) sur la question des fibres courtes d'amiante (FCA) en milieu professionnel. Cette saisine fait suite à la publication par l'Anses en novembre 2022 d'un rapport d'expertise relatif à une mise à jour des données sanitaires et des données d'exposition aux fibres courtes d'amiante (FCA) depuis 2009, date à laquelle l'Anses avait publié une première expertise sur le sujet des FCA (Anses 2009, 2022). L'expertise de 2022 prenait également en compte les données relatives aux particules minérales allongées d'intérêt (PMAi) courtes (Anses 2022).

L'expertise de 2022 a confirmé, en milieu professionnel, une exposition majoritaire aux FCA/PMAi courtes, ainsi que des concentrations en FCA/PMAi courtes pouvant être très élevées. En environnement général intérieur, la présence de FCA a été identifiée dans près de la moitié des environnements investigués sans détecter de fibres longues dans 1/3 de ces situations (CSTB 2013). L'expertise a également souligné le fait qu'il n'existe pas de protocole harmonisé de comptage des FCA/PMAi courtes, et les travaux expertisés précisent rarement les critères de comptage appliqués. Chez l'humain, la mise à jour des données a permis d'identifier quelques données supplémentaires qui vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA/PMAi courtes, avec toutefois des difficultés d'interprétation. De même, les données de biométrie, bien que confirmant la part importante représentée par les FCA/PMAi courtes dans des échantillons pulmonaires de travailleurs, par rapport à l'ensemble des fibres/PMAi identifiées, n'ont pas apporté d'éléments sur la pathogénicité des FCA/PMAi courtes. Chez l'animal, les nouvelles données étaient trop peu nombreuses pour permettre une conclusion robuste sur la toxicité intrinsèque des FCA/PMAi courtes. Au final, ces nouvelles données ne permettaient pas, tout comme cela avait été conclu en 2009, d'envisager la construction d'une relation dose-réponse et la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires (ERS) pour les FCA/PMAi courtes.

Suite aux recommandations de l'Anses de 2022, et afin de préparer un éventuel travail réglementaire, la DGT a saisi l'Anses le 23 novembre 2022 sur le sujet de la dangerosité, de l'émissivité et de la métrologie des FCA en milieu professionnel.

En accord avec les demandeurs, le périmètre de la saisine a été précisé afin de :

1. Apporter des éclaircissements *via* une synthèse des conclusions du rapport de 2022 portant spécifiquement sur le danger des FCA en environnement professionnel complétée, le cas échéant, par les nouvelles études publiées, sur le niveau de dangerosité des FCA en environnement professionnel. A défaut de pouvoir conclure sur ce sujet, il est demandé de détailler les méthodes permettant d'évaluer précisément la dangerosité des FCA pour les travailleurs exposés.
2. Fournir un cahier des charges technique pour la réalisation des mesures : stratégie, méthodes de mesure à mettre en œuvre (prélèvement et analyse), :
  - ✓ Pour les mesurages portant sur la réalisation de processus ou de phases opérationnelles émettant des FCA ;
  - ✓ Pour les mesurages environnementaux effectués durant la réalisation de travaux exposant aux FCA par application des dispositions des articles R 4412-124 et R 4412-128 du code du travail.

3. Fournir des données sur le niveau d'émissivité des FCA en documentant les listes les plus complètes possibles :
  - a. Des catégories d'objets géologiques ainsi que des familles de matériaux et produits manufacturés susceptibles de comporter un nombre important de FCA ;
  - b. Des types de techniques et modes opératoires susceptibles de favoriser, lorsque mis en œuvre, une émission de FCA, si possible en identifiant les techniques et modes opératoires les plus émissifs en FCA ;
  - c. Des moyens de protection collective (MPC) susceptibles d'abaisser efficacement la concentration en FCA au poste de travail de l'opérateur mettant en œuvre le processus considéré.

Ces listes devront permettre de recouvrir les différentes situations de travail pouvant conduire, en pratique, à l'exposition des travailleurs aux FCA.

4. Fournir des indications sur la manière de prendre en compte les FCA pour redéfinir les niveaux réglementaires d'empoussièrtements à l'amiante fixés à l'article R 4412-98 du code du travail. Ces indications devront intégrer une éventuelle variation de la VLEP-8h actuelle dès lors que celle-ci devrait intégrer le décompte des FCA.

Dans sa saisine, la DGT a précisé que ses questions portent exclusivement sur les FCA des 6 espèces minérales réglementées, et ne concernent pas les PMAi courtes.

## 2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ». L'Anses a confié l'expertise au groupe de travail (GT) « Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel ». Les travaux ont été présentés au CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 20 janvier 2023 et le 25 avril 2024. Ils ont été adoptés par le CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » réuni le 25 avril 2024.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet : <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

## 3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU GT ET DU CES

### 3.1. Méthode de travail

Pour conduire l'expertise, le GT s'est appuyé sur plusieurs sources de données :

- Une revue de la littérature visant à mettre à jour les données publiées sur les effets sanitaires et l'exposition aux FCA depuis l'expertise publiée en 2022. L'équation de recherche utilisée pour identifier les articles *via* Pubmed et Scopus sur la période post

2021 est identique à celle utilisée dans l'expertise de 2022 : (*"short" OR "size" OR "dimension" OR "lenght"*) AND (*"asbestos" OR "chrysotile" OR "actinolite" OR "anthophyllite" OR "tremolite" OR "amosite" OR "crocidolite" OR "amphibole" OR "elongated mineral particle" OR "taconite" OR "vermiculite" OR "libby amphibole" OR "fluoroedenite"*);

- Une consultation d'organismes afin de disposer d'informations complémentaires sur la mesure des FCA, l'émissivité des matériaux en FCA et l'efficacité des moyens de protection. Les organismes consultés sont le BAuA (Institut fédéral allemand en matière de santé-travail), le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), le HSE (Health and safety executive), et l'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) ;
- La base de données Scola, au travers du rapport d'activité 2012-2022 (INRS 2023) afin d'identifier les situations d'exposition professionnelle à l'amiante fréquentes (matériaux traités et techniques mises en œuvre) ;
- Les normes existantes décrivant les méthodes d'échantillonnage, de prélèvement et d'analyse des fibres d'amiante réglementaires ;
- La recherche de documents historiques sur l'amiante afin d'évaluer si certains procédés historiques d'extraction et de production d'amiante discriminaient les fibres selon leur taille.

## 3.2. Résultats de l'expertise

### 3.2.1. Effets sanitaires des FCA

#### ■ Nouvelles études identifiées

Cinq nouvelles études ont été identifiées dans la littérature.

Une revue de la littérature par Bernstein (2022), qui s'appuie sur une analyse des données épidémiologiques et expérimentales *in vivo* et *in vitro*, conclut que les FCA de chrysotile et d'amphiboles de longueur inférieure à 5-10  $\mu\text{m}$ , bien que présentes dans la plupart des expositions professionnelles ou environnementales, ne contribuent pas aux effets sur la santé liés à l'amiante. A l'issue de l'analyse par le GT à l'aide de la grille AMSTAR2, le niveau de confiance dans la qualité de cette revue a été classé « faible ». La sélection des publications discutées dans la revue est notamment mal définie. Cette étude n'apporte pas de nouveaux éléments sur la toxicité des FCA. Il est à noter que dans cette étude, les FCA sont définies par l'auteur comme ayant une longueur inférieure à 10  $\mu\text{m}$ , ce qui modifie la définition habituelle des FCA qui fait référence aux fibres de longueur inférieure à 5  $\mu\text{m}$ , et étendrait, d'après les auteurs, l'innocuité aux fibres jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  de longueur.

Deux études de modélisation du développement du mésothéliome et du cancer du poumon (Korchevsky et Wylie, 2022 ; Wylie et Korchevsky, 2023) qui exploitent une base de données issues de différentes cohortes épidémiologiques, qui comportent des informations sur le risque de mésothéliome et de cancer du poumon, et des informations détaillées sur les caractéristiques dimensionnelles de fibres d'amiante auxquelles ont été exposés les sujets. Elles évaluent les corrélations entre des facteurs de cancérrogénicité publiés et de nombreux facteurs dimensionnels des fibres pour en déduire un modèle prédictif de la cancérrogénicité. La première étude (Korchevsky et Wylie, 2022) ne présente pas de résultats concernant spécifiquement les fibres de longueur inférieure à 5  $\mu\text{m}$ . L'application des équations définies dans cette étude par le GT montre qu'une exposition exclusive à des FCA ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ) peut être associée à un potentiel cancérogène non nul ( $R_M$  – pour le facteur de cancérrogénicité pour le

mésothéliome - et/ou  $R_L$  – pour le facteur de risque de cancer du poumon – présentent une valeur  $> 0$ ), dès lors que les fibres sont suffisamment fines. Les résultats de la seconde étude (Wylie et Korchevsky, 2023) indiquent que le diamètre des fibres est un meilleur prédicteur du risque de mésothéliome que la longueur des fibres. La conclusion des auteurs selon laquelle les FCA ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ) ne contribuent pas au risque de cancer s'appuie sur le fait que pour cette catégorie de fibres, aucun coefficient de corrélation avec le facteur de cancérogénicité du mésothéliome ( $R_M$ ) n'est statistiquement significatif. Cependant, les valeurs des coefficients de corrélations ne sont pas indiquées par les auteurs, et le fait que les résultats soient significatifs ou non ne reflète que la puissance statistique. Enfin, il est dit plus généralement que les particules de moins de  $5 \mu\text{m}$  ne contribuent pas significativement au risque de cancer en général, alors que les calculs n'ont pas été effectués pour le cancer du poumon. Cette conclusion que les fibres dont la longueur est inférieure à  $5 \mu\text{m}$  quel que soit leur diamètre ne semble pas avoir d'impact sur le risque de cancer n'est donc pas complètement justifiée par les résultats.

Deux études *in vitro*, qui concluent que les FCA ont des effets biologiques. Les résultats de la 1<sup>ère</sup> étude (Gualtieri *et al.* 2023) montrent qu'un échantillon de fibres longues de chrysotile est plus actif (production de ROS<sup>1</sup> entraînant un stress oxydatif) qu'un échantillon de fibres courtes de chrysotile mais que ce dernier n'est pas dépourvu d'effets biologiques sur les cellules et est actif (ROS) dans un système acellulaire. Les résultats de la seconde étude mettent en évidence des mécanismes différents entre les fibres courtes et les fibres longues sur les mécanismes de mort cellulaire : les fibres courtes d'amosite induisent une mort cellulaire par pyroptose (mort cellulaire lytique immunogène) qui passe par l'activation (clivage) de GSDMD<sup>2</sup>, la production d'IL-1 $\alpha$ , et l'implication du récepteur Toll-like 4 (TLR4), tandis que les fibres longues d'amosite induisent une mort cellulaire par « apoptose indirecte », qui passe par la production d'IL-1 $\alpha$ , et de TNF- $\alpha$  *via* l'activation de caspases-3/-7 et TLR4, de ROS et de « scavenger receptors<sup>3</sup> » (Leinardi *et al.* 2023).

#### ■ Méthode permettant d'évaluer le danger des FCA en environnement professionnel

- ▶ Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser une étude épidémiologique

La principale limite des études épidémiologiques identifiées dans la littérature jusqu'à présent pour étudier les effets des FCA est le fait que les populations sont majoritairement exposées à des mélanges de FCA et de fibres longues d'amiante, sans qu'il soit possible de savoir si les effets sanitaires observés sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre aux fibres courtes. Pour évaluer le risque associé aux FCA, il est nécessaire d'identifier des populations de travailleurs exposés exclusivement (ou quasi exclusivement) aux FCA, et n'ayant pas été exposés à des fibres longues d'amiante au cours de leur carrière professionnelle. A ce jour, la seule population identifiée de travailleurs exposés quasi-exclusivement aux FCA sont les travailleurs exposés durant le nettoyage des dalles de sol en vinyle amiante (DVA) par des monobrosses. Parmi ces travailleurs, les agents de service hospitalier (ASH) ne sont habituellement exposés à l'amiante lors de leur activité professionnelle que via le nettoyage des DVA.

---

<sup>1</sup> Espèces réactives de l'oxygène

<sup>2</sup> Gasdermin D : protéine activée qui déclenche la mort cellulaire pyroptotique

<sup>3</sup> Famille de récepteurs membranaires de la surface des macrophages qui reconnaissent des ligands (tels que protéines, bactéries, pathogènes) permettant leur dégradation et leur capture.

Les études réalisées sur les ASH à partir des données du Programme National de Surveillance du Mésothéliome (PNSM) apportent des résultats contradictoires et ne permettent pas de conclure sur le danger des FCA concernant le risque de mésothéliome. La conduite d'une étude de cohorte prospective sur une population d'ASH ne permettra pas de répondre à la question. Cela est lié aux difficultés de suivi et au fait que le recours de plus en plus fréquent à la sous-traitance à des entreprises extérieures pour la réalisation de ces tâches limite la probabilité d'exposition "quasi-exclusive" aux FCA. Il serait intéressant d'identifier d'autres catégories professionnelles exposées quasi-exclusivement aux FCA pour la réalisation d'une nouvelle étude à partir des données du PNSM, ou d'une étude de cohorte ou cas-témoins sur le mésothéliome ou sur le cancer du poumon. Pour la réalisation d'une étude de cohorte rétrospective ou d'une étude cas témoins, la difficulté principale est d'identifier rétrospectivement des expositions professionnelles quasi exclusives aux FCA.

- ▶ Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser des études *in vitro* ou *in vivo*

Il ne paraît pas pertinent de proposer des études d'exposition chronique *in vivo* étant donné les nombreuses publications analysées qui ont déjà observé un effet biologique des FCA. La réalisation d'études *in vitro* (cytotoxicité, génotoxicité) nécessite en premier lieu d'étudier la faisabilité de collecter des FCA émises par exemple, lors du nettoyage des DVA à la monobrosse, voire de préparer des échantillons de FCA à partir d'amiante naturel (environnemental). Ces expérimentations *in vitro* apporteraient des éléments partiels intéressants et utiles sur le danger des FCA. Néanmoins, ces approches expérimentales peuvent présenter des limites liées à d'éventuelles contaminations, à la modification de la réactivité de surface, etc.

### 3.2.2. Présence de FCA dans les matériaux et émissivité

Il n'a pas été identifié de données sur la présence et l'émissivité de FCA depuis les matériaux naturels. La capacité à libérer des FCA dépend des minéraux en présence, du degré d'altération du matériau et de la nature et de l'intensité des contraintes appliquées au matériau. Concernant les matériaux manufacturés, certains matériaux sont connus pour contenir des fibres d'amiante « plus courtes » dès leur production. Ces produits peuvent être regroupés en trois catégories principales :

- Produits de construction et de revêtement : revêtements de toiture, feutres de toiture, autres revêtements, peintures, enduits, mastics, tuiles de plancher, plâtre acoustique, composés d'asphalte, revêtements de sol, ciments pour joints et isolation, charges dans les carreaux de sol en vinyle, charge minérale fibreuse, charges dans les peintures, papiers et plastiques ;
- Produits automobiles : garnitures de freins moulées, garnitures d'embrayage, production de produits de friction ;
- Autres produits fibreux et plastiques : produits moulés à chaud et à froid, composés thermoplastiques.

Les fibres « plus courtes » se réfèrent dans ce cas à des longueurs millimétriques et non au seuil de 5 µm communément employé pour différencier les FCA en microscopie.

Il n'existe pas de données d'émissivité obtenues en conditions expérimentales. Il existe par contre des données de concentrations en fibres retrouvées dans l'air, lors de mesures sur opérateurs ou d'ambiance en environnement professionnel, avec potentiellement l'application de moyens de protection collective. Ces données de concentrations permettent indirectement

d'approcher la notion d'émissivité. Les résultats du projet Davynylair (LAFP 2023), et d'autres campagnes exploratoires (DGT 2011 et INRS 2022) déjà exploitées dans l'expertise Anses de 2022, indiquent que des concentrations élevées en FCA peuvent être mesurées dans l'air pour certains matériaux et lors de différentes situations de travail exposant à l'amiante. Cela concerne :

- Les isolants acoustiques, plâtres amiantés, peintures et enduits intérieurs et extérieurs, colles de carrelage mural, flocages, canalisations / toitures / plaques en amiante ciment, mastics, DVA ;
- Certaines techniques de retrait ou traitement : sablage, burinage / piquage, ramassage de déchets, rectification / ponçage, grenailage, arrosage, perçage / vissage / carottage / tirage de câbles / décapage, THP-UHP (Très haute pression-ultra haute pression), spatule / raclage, décapage à sec des DVA.

La majorité des matériaux pour lesquels des FCA dans l'air sont principalement retrouvées font également partie des matériaux pour lesquels de l'amiante « plus court » a été intégré : peintures et enduits intérieurs et extérieurs, ciment, mastics, toitures, isolants acoustiques, plâtres amiantés, DVA. Cependant, il est tout à fait possible que des FCA soient tout de même émises depuis des matériaux contenant des fibres de longueur plus importante, lors du processus de fragmentation.

Parmi les situations ayant fait l'objet du plus grand nombre de mesures effectuées dans le cadre des contrôles réglementaires d'exposition à l'amiante (INRS 2023), certains matériaux et techniques fréquemment mis en œuvre ont été identifiés comme contenant potentiellement des fibres plus courtes d'amiante ou émettant des FCA dans l'air d'après les résultats de campagnes exploratoires, et sont rapportés dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Matériaux, techniques de retrait ou de traitement faisant l'objet du plus grand nombre de mesures effectuées dans le cadre des contrôles réglementaires d'exposition à l'amiante (INRS 2023) et identifiées comme émettant des FCA dans l'air d'après les résultats de campagnes exploratoires**

Matériaux	Techniques de retrait ou de traitement
<ul style="list-style-type: none"><li>• Toiture – Bardage – Canalisations – Plaques en amiante ciment ;</li><li>• Revêtement de sol ;</li><li>• Colle de carrelage ;</li><li>• Élément / produit de friction ;</li><li>• Enduit – Mastic – Peinture (extérieur / intérieur) – Ciment.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Burinage – Piquage ;</li><li>• Ramassage ;</li><li>• Ponçage ;</li><li>• Raclage ;</li><li>• Perçage ;</li><li>• Rectification.</li></ul>

Ces comparaisons doivent être interprétées avec prudence au regard des incertitudes associées. Les données en FCA restent parcellaires, les campagnes effectuées n'étant pas représentatives et ne couvrant donc pas l'ensemble des matériaux ou techniques. De manière générale, un besoin d'études est signalé.

### 3.2.3. Cahier des charges pour la mesure de FCA en environnement professionnel

Il n'existe pas de protocole harmonisé pour le prélèvement et l'analyse des FCA. Dès 2009, l'Anses a préconisé de comptabiliser les FCA et a proposé en 2017 des critères d'arrêt de comptage des PMAi courtes dans les 2 protocoles de mesures exploratoires élaborés pour la mesure de PMAi dans les matériaux et dans l'air. En 2022, l'Anses a affiné ses

recommandations concernant le comptage des FCA et a recommandé d'investiguer la formation des amas de FCA, dont la présence est rarement documentée dans les rapports d'essais, afin de déterminer si ces amas sont présents dans l'aérosol prélevé ou s'ils sont engendrés par le mode de préparation des filtres de prélèvement d'air. Les recommandations sur le comptage différencié des FCA sont rappelées et des précisions sur ces éléments ont été apportées par le GT.

■ Modalités de comptage des fibres

L'ensemble des fibres respectant les critères dimensionnels suivants sont à considérer :  $L > 0,5 \mu\text{m}$  ; diamètre  $D < 3 \mu\text{m}$  ; rapport  $L/D > 3$ . Il est recommandé de procéder à un comptage différencié des FCA et des fibres longues, en appliquant les modalités de comptage suivantes pour les FCA :

- 1) Le comptage est réalisé sur au moins 2 grilles de microscopie électronique et sur au moins 2 ouvertures de grilles par grille, soit au moins 4 ouvertures de grille ;
- 2) Les critères d'arrêt de comptage sont :
  - a) avoir compté au moins 100 FCA ;

ou

- b) avoir observé un nombre d'ouvertures minimum correspondant à la sensibilité analytique (SA) visée. Celle-ci est de 0,3 FCA/L pour les prélèvements en air ambiant et de 1 FCA/L pour les mesures individuelles en hygiène du travail.<sup>4</sup>

Le comptage des fibres longues doit être poursuivi même si le critère d'arrêt de 100 FCA est atteint, ceci afin de ne pas sous-estimer le nombre de fibres longues. Le comptage des fibres longues est poursuivi jusqu'à atteindre la SA visée ou le nombre de 100 structures fibreuses.

■ Modalités de comptage des amas

Les fibres, qu'elles soient longues ou courtes, ne se présentent pas systématiquement sous forme individuelle. En effet, des regroupements de fibres, voire de particules, sont fréquemment observés. Dans les normes, ces assemblages sont qualifiés de « structures fibreuses d'amiante » et peuvent être de plusieurs types : des « faisceaux de fibres », des « agglomérats » ou des « matrices-composites ». A l'heure actuelle, certains assemblages sont déjà considérés dans les analyses car, selon les règles définies par les normes, toute structure fibreuse est comptabilisée dès lors qu'elle a les dimensions recherchées. Le référencement des différents types de structures est déjà prévu par les normes avec les exemples de fiches d'analyse en annexe H de NF X43-050 qui comprennent une colonne spécifique pour le type de structure. En revanche, le résultat rendu par l'analyse est une valeur globale en fibres par litre, sans précisions sur les types de structures rencontrées dans l'échantillon analysé. En présence de regroupements de fibres, le résultat du comptage est grandement sous-estimé. En effet, ils peuvent contenir plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de fibres qu'il est impossible de dénombrer séparément.

Ainsi, il est préconisé, qu'au fur et à mesure du dénombrement des fibres longues et courtes, de manière différenciée et avec les critères d'arrêt définis plus haut, l'ensemble des structures prenant la forme d'amas soient analysées en relevant des critères spécifiques d'ordre

---

<sup>4</sup> Dans la mesure où il n'existe pas de valeur seuil pour les FCA dans l'air ambiant ni de VLEP pour les FCA, la SA pour les FCA est prise par défaut identique à la SA pour les fibres longues. Ceci permet de comparer les données acquises sur les différentes populations de fibres. Ces valeurs de référence et SA peuvent être amenées à évoluer dans le temps en fonction des réglementations.

dimensionnel : par exemple les longueurs ou diamètres moyens, les diamètres de Féret minimum et maximum, ou encore la surface.

Par rapport aux définitions des types de structure fibreuse dans les normes, le GT propose que soient qualifiées d'amas de fibres les structures dites « compactes », aussi bien les agglomérats que les matrices-composites. Le GT propose qu'un seuil de 9 fibres soit utilisé pour qualifier un amas de fibres conformément aux recommandations de la norme NF ISO 13794.

#### **3.2.4. Moyens de protection collective**

Il n'a pas été identifié d'étude sur les MPC concernant les FCA. D'après les quelques études expérimentales existantes et comme déjà conclu par l'expertise de l'Anses de 2011 relative aux MPC et équipements de protection individuels (EPI) pour l'amiante, les fibres semblent être mieux filtrées que les sphères de diamètres aérodynamiques correspondants (Anses 2011). De plus, la théorie de la filtration prévoit que plus on descend en longueur et en diamètre, plus on s'approche du comportement des particules. Par conséquent, les FCA devraient avoir des comportements assimilables à ceux des particules et il serait possible d'appliquer les modèles théoriques d'efficacité de filtration/collection, avec des efficacités attendues similaires.

### **3.3. Conclusions**

Il n'a pas été identifié de nouvelle étude épidémiologique sur l'exposition des travailleurs aux FCA. Le GT rappelle que les études expertisées en 2022 mettaient en évidence un effet possible des FCA, avec des difficultés d'interprétation. En effet, en l'état des connaissances, il n'est pas possible de savoir si les effets sanitaires observés chez les travailleurs exposés à des FCA sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre aux fibres courtes.

Pour statuer sur le danger des FCA, il serait nécessaire de disposer d'études menées sur des populations exposées exclusivement (ou quasi-exclusivement) aux FCA. A ce jour, la seule population de travailleurs connue comme étant exposée quasi-exclusivement aux FCA est celle des travailleurs nettoyant des dalles de sol en vinyle amiante (DVA) à l'aide de monobrosses. Parmi ces populations, les agents de service hospitalier (ASH) sont particulièrement d'intérêt pour étudier les effets sanitaires des FCA car il n'existe habituellement pas d'autre exposition professionnelle à l'amiante que le nettoyage des DVA. Cependant, les données disponibles ne permettent pas de conclure sur un éventuel effet des FCA sur le risque de mésothéliome.

L'acquisition de données d'exposition professionnelle aux FCA est essentielle avant d'envisager la réalisation de nouvelles études épidémiologiques. Dans le cas où les travailleurs sont exposés à un mélange de FCA et de fibres longues, il est nécessaire que les résultats des études soient exprimés en fonction de la composition de l'aérosol pour pouvoir comparer les risques en fonction de la granulométrie des fibres. Cette approche est la plus adaptée pour estimer l'effet des FCA en tenant compte de l'effet des fibres longues.

Les deux nouvelles études *in vitro* identifiées dans la littérature confirment que même si les FCA ont un effet moindre que celui des fibres longues, elles sont biologiquement actives et par conséquent, que leurs effets pathologiques ne peuvent pas être exclus. Ces résultats sont soutenus par plusieurs études sur les nano-fils d'argent « courts », même si ceux-ci ne peuvent pas être directement extrapolés aux FCA. La réalisation de nouvelles études *in vitro* de cytotoxicité ou de génotoxicité apporterait des éléments partiels intéressants et utiles sur

la toxicité des FCA mais cela nécessite d'étudier au préalable la possibilité de constituer des échantillons de FCA sans avoir recours à une sélection des FCA au moyen de traitements susceptibles de modifier leurs propriétés intrinsèques.

Le GT rappelle en outre que les caractéristiques dimensionnelles ne sont pas les seuls paramètres responsables de la toxicité de l'amiante. D'autres paramètres comme la réactivité de surface ou la composition chimique conditionnent l'interaction avec les cellules et/ou la réponse cellulaire et contribuent aux effets observés. Par ailleurs, il est possible que la présence de FCA en grand nombre puisse influencer la réponse biologique aux fibres longues. Enfin, les FCA peuvent former des structures en amas et des faisceaux, dont le devenir dans l'organisme et les impacts biologiques ne sont pas documentés.

**Au final, les conclusions de 2022 restent inchangées : malgré des difficultés d'interprétation, les données chez l'humain vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA. Les quelques nouvelles données expérimentales confirment que les FCA ont des effets biologiques propres.**

Aucune nouvelle donnée d'exposition professionnelle aux FCA n'a été identifiée dans la littérature, à l'exception de l'étude Davynylair. Cette étude confirme que les travailleurs nettoyant les DVA sont exposés quasi exclusivement aux FCA, à des concentrations élevées.

Il n'a pas été identifié de données d'émissivité en FCA depuis les matériaux naturels dans la littérature. Des données d'émissivité en PMAi courtes depuis des matériaux naturels seront prochainement disponibles via le projet « CARTO PMAi » coordonné par l'Organisme Professionnel Prévention Bâtiment Travaux Publics (OPPBTP).

Les données concernant les matériaux manufacturés sont très parcellaires. Il est possible d'identifier des catégories de matériaux dans lesquels des fibres d'amiante « plus courtes » ont été intégrées (peintures, enduits, mastics, ciments pour joints et isolation, plâtres acoustiques, revêtements de toiture, de sol, charges dans les carreaux de sol en vinyle). Les données d'émissivité disponibles confirment une forte proportion de FCA dans les mesures d'émissivité réalisées lors de diverses interventions sur certains de ces matériaux. Cependant, les données disponibles montrent également que des FCA peuvent être émises en quantité importante depuis des matériaux contenant préférentiellement des fibres longues. A noter que ces données sont pour la plupart issues d'études qui n'avaient pas pour objectif de mesurer les FCA, ce qui a pu engendrer des difficultés analytiques et conduire à une incertitude plus grande sur les résultats.

Comme souligné en 2022, il n'existe pas de protocole harmonisé pour le prélèvement et l'analyse des FCA. Aucun élément ne justifie d'appliquer des méthodes différentes de ce qui est déjà réalisé pour les fibres longues concernant l'échantillonnage, le prélèvement et l'analyse d'échantillons d'air. Des précisions sur le comptage différencié des FCA et des fibres longues et sur la prise en compte spécifique des amas ont été apportées par le GT.

En conclusion, les connaissances et données disponibles sont insuffisantes pour envisager actuellement une révision de la VLEP-8h pour intégrer le décompte des FCA, et une re-définition des niveaux réglementaires d'empoussièrtements pour tenir compte des FCA. Néanmoins il existe des situations pour lesquelles la VLEP-8h est respectée alors que les travailleurs sont exposés aux FCA. Ces situations justifieraient la mise en place de mesures de prévention.

### 3.4. Recommandations

#### ■ Recommandations en matière de prévention des risques professionnels

Le CES recommande :

- ▶ De veiller à ce que les niveaux d'exposition aux fibres longues et aux FCA soient les plus bas possibles. La présence de fibres d'amiante longues ou courtes doit impliquer des mesures de prévention ;
- ▶ D'établir, une fois des données métrologiques obtenues, une VLEP pragmatique<sup>5</sup> visant à limiter les expositions professionnelles aux FCA et à mettre en œuvre des mesures de prévention ;
- ▶ Que des études complémentaires et spécifiques aux FCA soient menées sur l'efficacité des moyens de protection collective.

#### ■ Recommandation pour l'acquisition de données d'exposition professionnelle aux FCA

Le CES recommande :

- ▶ De mesurer les FCA et les amas de fibres en même temps que les fibres longues dans les environnements professionnels dans le but d'alimenter une base de données documentant les concentrations en FCA pour les différents processus. Dans un premier temps, une étude visant à ré-analyser les filtres d'échantillons d'air ou grilles de microscopie électronique disponibles dans les laboratoires accrédités pour la mesure d'empoussièrement en fibres d'amiante pourrait être menée.
- ▶ En complément, il pourrait être intéressant de mesurer les longueurs et diamètres et d'établir la granulométrie complète des fibres comptées. Dans ce cas, l'ensemble des fibres d'amiante respectant les critères dimensionnels ( $L > 0,5 \mu\text{m}$  ; diamètre  $D < 3 \mu\text{m}$  ; rapport  $L/D > 3$ ) seraient à dénombrer et à mesurer, afin d'obtenir une fréquence d'occurrence en fonction des longueurs et diamètres de fibres.

Pour la réalisation d'une telle étude, il est recommandé :

- ▶ De s'appuyer sur le cahier des charges proposé dans le cadre de cette expertise pour la mesure des FCA et des amas;
- ▶ D'investiguer en priorité les processus ou les couples matériaux/techniques les plus fréquemment mis en œuvre.

#### ■ Recommandations en matière de recherche

**Les recommandations de 2022 en matière de recherche restent valables et ont été complétées au regard des constats de cette expertise.**

Ainsi, pour l'étude des effets sanitaires des FCA, le CES recommande :

- ▶ Que la surveillance épidémiologique du mésothéliome inclut les expositions aux FCA et privilégie les analyses portant sur les populations exposées à ces fibres ;
- ▶ Que des études épidémiologiques soient mises en place sur des populations quasi-exclusivement exposées aux FCA quand les données d'exposition le permettront ;

---

<sup>5</sup> En l'absence de données quantitatives suffisantes pour établir une valeur, il est possible de recommander des VLEP dites pragmatiques, proposées dans un objectif de prévention (Anses 2017b).

- ▶ Que les résultats des études épidémiologiques sur les populations exposées à l'amiante soient exprimés de façon à permettre les analyses par classes granulométriques.

Pour la conduite d'études expérimentales, le CES recommande :

- ▶ De développer une méthode de sélection des FCA n'altérant pas leurs propriétés intrinsèques ;
- ▶ De réaliser, avec des échantillons adéquats, des études pour documenter le potentiel génotoxique ;
- ▶ De réaliser les tests *in vitro* permettant de mieux comprendre les possibles interactions entre fibres courtes et fibres longues (voire avec d'autres particules présentes dans des milieux de travail complexes).

Concernant la problématique des amas identifiés lors de la lecture au microscope, le CES recommande :

- ▶ Que la formation des amas soit investiguée afin de déterminer s'ils sont liés à la nature du matériau, au type de technique appliquée au matériau ou à son usure, et/ou s'ils sont attribuables aux modalités de préparation des échantillons. Pour cela, il est recommandé d'effectuer des prélèvements en parallèle et de les comparer en préparant les filtres selon la méthode directe (ISO 10312:2019) et selon la méthode indirecte (NF X 43-050). A noter qu'une telle étude n'est possible que pour des empoussièrtements faibles.

#### 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens ».

Comme en 2022, l'Agence note que les données disponibles vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA et que les données de métrologie confirment la présence prépondérante de FCA dans l'air et en concentration parfois très importante, avec des situations pour lesquelles les travailleurs sont exposés quasi-exclusivement à des FCA. De façon similaire à la conclusion de l'expertise de l'Anses de 2022, les données disponibles ne permettent pas d'envisager la construction d'une relation dose-réponse pour les FCA et par conséquent d'envisager actuellement une révision de la VLEP-8h relative à l'amiante pour intégrer le décompte des FCA. Néanmoins, compte tenu de ces éléments et du fait qu'il existe des situations pour lesquelles la VLEP-8h pour l'amiante est respectée alors que les travailleurs sont exposés à des FCA, l'agence recommande de veiller à ce que les niveaux d'exposition aux FCA soient les plus bas possibles et appuie la recommandation d'établir une VLEP pragmatique pour les FCA.

Dans cet objectif, l'Anses souligne le besoin préalable d'acquisition de données de métrologie pour documenter les situations d'exposition professionnelle aux FCA, en s'appuyant sur le cahier des charges proposé dans cette expertise pour le comptage des fibres longues, des FCA et des amas de fibres. Ces nouvelles données sont également nécessaires avant d'envisager la réalisation de nouvelles études sur les effets sanitaires des FCA.

Pr Benoît Vallet

## MOTS-CLÉS

Amiante, fibres courtes d'amiante, effets sanitaires, exposition, émissivité, protocole de mesure

Asbestos, short asbestos fibres, health effect, exposure, emissivity, measurement protocol

## CITATION SUGGÉRÉE

Anses. (2024). Avis de l'Anses relatif aux fibres courtes d'amiante en milieu professionnel. (saisine 2022-SA-0223). Maisons-Alfort : Anses, 13 p.



---

## **Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel**

---

**Saisine « n°2022-SA-0223 »**

# **RAPPORT d'expertise collective**

**CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens »**

**Groupe de travail « Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel »**

**Avril 2024**

### **Citation suggérée**

---

Anses. (2024). Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel. (saisine 2022-SA-0223). Maisons-Alfort : Anses, 97 p.

### **Mots clés**

---

Amiante, fibres courtes d'amiante, effets sanitaires, exposition, émissivité, protocole de mesure

Asbestos, short asbestos fibres, health effect, exposure, emissivity, measurement protocol

## Présentation des intervenants

**PRÉAMBULE** : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

### GROUPE DE TRAVAIL

---

#### Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Rennes 1 - Inserm U1085 Irset – Centre hospitalier universitaire de Rennes) – Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles, santé au travail.

#### Membres

Mme Marie-Annick BILLON-GALLAND – Expert indépendant – Spécialités : métrologie des fibres.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Céline EYPERT-BLAISON – Responsable d'études [Institut National de Recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS)] – Spécialités : métrologie des fibres.

Mme Marie-Claude JAURAND – Directrice de recherche émérite [Institut national de la santé et de la recherche médicale (Inserm)] – Spécialités : toxicologie, biologie du cancer.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche [Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (Inserm)] – Spécialités : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Joannie MARTIN – Chercheuse [Institut de Recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail] – Spécialités : caractérisation et métrologie des fibres et particules minérales.

M. Laurent MARTINON – Ingénieur hygiéniste, directeur du Laboratoire Amiante Fibres et Particules (LAFP) [Service des Laboratoires de Santé Environnementale, Ville de Paris] – Spécialités : métrologie des fibres.

### RAPPORTEURS

---

M. Didier LAHONDERE – Géologue, Directeur adjoint au Bureau de Recherche Géologiques et Minières (BRGM) – Spécialité : géologie.

### COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

---

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

- CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » – 2020-2024

**Président**

Mme Rachel NADIF – Responsable d'équipe, chargée de recherche, (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, CESP U1018) – Spécialités : épidémiologie, santé respiratoire.

**Vice-président**

M. Hervé LABORDE-CASTEROT - Praticien hospitalier (Centre antipoison de Paris, AP-HP Nord Université Paris Cité) – Spécialités : pathologies professionnelles, toxicologie clinique, épidémiologie, allergologie.

**Membres**

Mme Sophie ACHARD – Maître de conférences (Faculté de Santé - Pharmacie - Université Paris Cité) – Spécialité : toxicologie environnementale.

M. Fabrice ALLIOT – Ingénieur d'études (École Pratique des Hautes Études) – Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, perturbateurs endocriniens.

M. Michel ANDRÉ – Directeur de recherche (Université Gustave Eiffel) – Spécialités : transports et pollution de l'air, métrologie et modélisation des émissions des véhicules et du trafic, méthodologies d'évaluation.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignante chercheuse (École des Hautes Études en Santé Publique, Université de Rennes – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires, identification des mélanges et modèles de risques associés, perturbateurs endocriniens.

M. Patrick BROCHARD – Professeur émérite (Université de Bordeaux) – Spécialités : pneumologie, pathologies professionnelles et environnementales, impact sanitaire des particules inhalées (amiante, silice...).

Mme Fleur DELVA – Praticien hospitalier, médecin de santé publique (Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine, prévention, reproduction, épidémiologie.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur Émérite des universités (Université de Bretagne Occidentale - Brest) – Spécialités : pathologies professionnelles, pneumologie, allergologie, tabacologie.

M. Marc DURIF – Directeur exécutif du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air - Spécialités : métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air, émissions industrielles et anthropiques, caractérisation des expositions, construction de stratégies de surveillances dans l'air dans différents contextes.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre Hospitalier Régional Universitaire de Lille, Université de Lille) – Spécialités : écologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. François GAIE-LEVREL — Coordinateur recherche (Airparif) – Compétences : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules. Spécialités : métrologie, pollution atmosphérique, aérosols, nanoparticules.

M. Philippe GLORENNEC - Enseignant chercheur (Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique, Université de Rennes - Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) - Spécialité : évaluation des expositions et des risques sanitaires d'origine chimique.

Mme Marianne GUILLEMOT – Responsable d'études (Institut National de Recherche et de Sécurité) – Spécialités : métrologie, surveillance atmosphérique et des environnements professionnels.

Mme Marion HULIN - Chargée de projet et d'expertise scientifique (Santé Publique France) – Spécialités : épidémiologie, qualité de l'air intérieur, santé environnement, évaluation des expositions.

Mme Bénédicte JACQUEMIN – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie environnementale, pollution atmosphérique.

M. Olivier JOUBERT – Maître de conférences (Université de Lorraine) – Spécialités : toxicologie, sécurité sanitaire, particules.

Mme Juliette LARBRE - Directrice du Laboratoire Polluants Chimiques (Service Parisien de Santé Environnementale) – Spécialités : qualité de l'air intérieur et extérieur, métrologie, santé environnement.

Mme Barbara LE BOT – Professeur des Universités, (École des hautes études en santé publique, Université de Rennes, Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : évaluation des expositions, santé publique, métrologie et méthode d'analyse des polluants de l'air et poussières.

Mme Johanna LEPEULE – Chargée de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : pollution de l'air, épidémiologie environnementale, santé périnatale, grossesse, épigénétique, modélisation des expositions.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) – Spécialités : épidémiologie, santé travail, expositions professionnelle et environnementale.

Mme Corinne MANDIN – Responsable du laboratoire d'épidémiologie (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) – Spécialités : évaluation des expositions aux substances chimiques et agents physiques et des risques sanitaires associés

Mme Anne OPPLIGER – Responsable de recherche (Unisanté : Centre universitaire de médecine générale et santé publique de Lausanne) – Spécialités : santé travail, risques biologiques, bioaérosols, agents zoonotiques.

M. Pierre PERNOT – Directeur Opérationnel (Airparif) – Spécialités : métrologie, surveillance et réglementation de la qualité de l'air.

M. Nhan PHAM-THI – Enseignant chercheur, médecin (Institut de Recherche Biomédicale des Armées, École Polytechnique) – Spécialités : allergologie, pneumologie.

---

## **PARTICIPATION ANSES**

---

### **Coordination et contribution scientifique**

M. Jérémie ACHILLE – Coordinateur d'expertise – Direction de l'évaluation des risques, Unité d'évaluation des risques liés à l'air, Anses

Mme Emmanuelle DURAND – Coordinatrice d'expertise – Direction de l'évaluation des risques, Unité d'évaluation des risques liés à l'air, Anses

Mme Amandine PAILLAT – Adjointe à la Cheffe d'unité - Direction de l'évaluation des risques, Unité d'évaluation des risques liés à l'air, Anses

### **Secrétariat administratif**

Mme Sophia SADDOKI – Anses

## SOMMAIRE

<b>Présentation des intervenants .....</b>	<b>3</b>
<b>Sigles et abréviations.....</b>	<b>9</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>11</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise .....</b>	<b>13</b>
1.1 Contexte .....	13
1.2 Objet de la saisine .....	13
1.2.1 Objet de la demande .....	13
1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	15
1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts .....	15
<b>2 Terminologie .....</b>	<b>16</b>
<b>3 Méthode générale de travail.....</b>	<b>20</b>
3.1 Revue de la littérature.....	20
3.2 Consultation d'organismes.....	20
3.3 Bases de données .....	21
3.4 Cadre normatif .....	21
3.5 Recherche de documents historiques sur l'amiante .....	21
<b>4 Effets sanitaires des FCA.....</b>	<b>22</b>
4.1 Rappel des paramètres influençant la toxicité de l'amiante .....	22
4.2 Rappel des conclusions de l'Anses 2022 .....	24
4.2.1 Données épidémiologiques.....	24
4.2.2 Données expérimentales .....	24
4.2.3 Données issues du PNSM et du RNV3P .....	24
4.3 Nouvelles données disponibles.....	25
4.3.1 Méthode de travail .....	25
4.3.2 Analyse des nouvelles études publiées dans la littérature scientifique.....	26
4.4 Méthode permettant d'évaluer le danger des FCA en milieu professionnel.....	30
4.4.1 Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser une étude épidémiologique .....	30
4.4.2 Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser des études <i>in vitro</i> ou <i>in vivo</i> .....	32
4.5 Conclusion.....	32
<b>5 Présence de FCA dans les matériaux et émissivité .....</b>	<b>34</b>
5.1 Rappel des conclusions de l'Anses de 2022 et méthode de travail .....	34
5.1.1 Rappel des conclusions de l'Anses de 2022.....	34
5.1.2 Méthode de travail .....	34

5.2	Présence de FCA et émissivité depuis les matériaux naturels .....	36
5.2.1	Présence de FCA dans les matériaux naturels .....	36
5.2.2	Emissivité en FCA depuis les matériaux naturels.....	37
5.3	Présence de FCA et d'amas de fibres, émissivité depuis les matériaux manufacturés 39	
5.3.1	Présence de FCA dans les matériaux manufacturés .....	39
5.3.2	Émissivité en FCA depuis les matériaux manufacturés.....	40
5.3.3	Identification de situations fréquentes d'exposition professionnelles à l'amiante .....	44
5.4	Conclusion.....	46
<b>6</b>	<b>Cahier des charges pour la mesure des FCA en environnement professionnel</b> <b>48</b>	
6.1	Rappel des préconisations émises par l'Anses en 2017 et en 2022.....	48
6.2	Nouvelles données disponibles.....	48
6.3	Préconisations techniques concernant l'échantillonnage et le prélèvement des FCA dans l'air en environnement professionnel.....	48
6.4	Préconisations techniques concernant la méthode d'analyse des FCA et des amas de fibres.....	49
6.4.1	Méthodes de préparation des échantillons.....	49
6.4.2	Modalités de comptage des fibres .....	50
6.4.3	Modalités de comptage des amas de fibres .....	50
<b>7</b>	<b>Moyens de protection collective.....</b>	<b>55</b>
7.1	Rappel des conclusions Anses 2011 sur les moyens de protection collective (MPC) et équipements de protection individuels (EPI) .....	55
7.2	Nouvelles données disponibles.....	55
7.3	Conclusion.....	57
<b>8</b>	<b>Discussion et conclusion du groupe de travail .....</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Recommandations.....</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>Bibliographie.....</b>	<b>62</b>
10.1	Publications .....	62
10.2	Normes.....	67
10.3	Législation et réglementation .....	68
	<b>Annexe 1 : Lettre de saisine .....</b>	<b>70</b>
	<b>Annexe 2 : Suivi des actualisations du rapport .....</b>	<b>73</b>
	<b>Annexe 3 : Représentation des types de fibres d'amiante selon leurs caractéristiques dimensionnelles (d'après Anses, 2009).....</b>	<b>74</b>
	<b>Annexe 4 : Consultations d'organismes : réponses transmises .....</b>	<b>75</b>
	<b>Annexe 6 : Tableau de synthèse des études expérimentales (in vivo et in vitro) analysées par l'Anses en 2022 (Anses 2022) .....</b>	<b>77</b>

<b>Annexe 7 : Liste des références éligibles sur le volet « effets sanitaires » et motifs d'inclusion et d'exclusion.....</b>	<b>84</b>
<b>Annexe 8 : Grille d'évaluation de la revue de Bernstein (2022) .....</b>	<b>89</b>
<b>Annexe 9 : Liste des références éligibles sur le volet « présence et émissivité des FCA depuis les matériaux » et motifs d'exclusion.....</b>	<b>91</b>
<b>Annexe 10 : Base de données Scola pour les fibres d'amiante réglementaires – données matériaux - sous-sections 3 et 4 (d'après INRS 2023) .....</b>	<b>93</b>
<b>Annexe 11 : Base de données Scola pour les fibres d'amiante réglementaires – données technique - sous-sections 3 et 4 (d'après INRS 2022) .....</b>	<b>95</b>

## Sigles et abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

AMSTAR : A Measurement Tool to Assess Systematic Reviews

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

APR : Appareil de protection respiratoire

ASH : Agents de service hospitalier

BAuA : Institut fédéral allemand en matière de santé-travail

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CEN : Comité européen de normalisation

CES : Comité d'experts spécialisé

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CSTB : Centre scientifique et technique du bâtiment

D : Diamètre

Dae : Diamètre aérodynamique

DGT : Direction générale du travail

DTA : Dossier technique amiante

DVA : Dalles de sol vinyle-amiante

EAO : Espèces actives de l'oxygène

EPI : Equipements de Protection Individuels

FCA : Fibre Courte d'Amiante

FFA : Fibre Fine d'Amiante

FPA : Facteurs de Protection Assignés

FPTI : Fiber Potential Toxicity Index

GT : Groupe de Travail

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

HSE : Health and safety executive

HV : Heaumes Ventilés

INRS : Institut national de recherche et de sécurité

IRSN : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

L : Longueur

LAFP : Laboratoire amiante, fibres et particules

L/D : Rapport d'allongement

MEBA : Microscopie électronique à balayage analytique

MET : Microscopie électronique à transmission

META : Microscopie électronique à transmission analytique

MOCP : Microscopie optique à contraste de phase

MPC : Moyens de protection collective

MPPS : Most Penetrating Particle Size

NTC : Nano-tubes de carbone

OMS : Organisation mondiale de la santé

OPPBTP : Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics

ORIGAMI : Outils de repérage interactif pour la gestion de l'amiante

PMA : Particule minérale allongée

PMAi : Particule minérale allongée d'intérêt

PNSM : Programme National de Surveillance du Mésothéliome

PRDA : Plan recherche et développement amiante

QAMA : Quebec Asbestos Mining Association

RNV3P : Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles

ROS : Espèces réactives de l'oxygène

SA : Sensibilité analytique

Scola : Système de collecte des informations des organismes accrédités

SPF : Santé Publique France

TEV : Tenues Etanches Ventilées

THP-UHP : Très haute pression-ultra haute pression

UICC : Union internationale contre le cancer

VLEP : Valeur limite d'exposition professionnelle

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 : Minéraux amiantes et leurs homologues non amiantes : composition chimique et numéro CAS</b> .....	17
Tableau 2 : Dimensions des fibres des échantillons testés dans l'étude de Gualtieri <i>et al.</i> 2023 .....	29
Tableau 3 : Dimensions des fibres des échantillons testés dans l'étude de Leinardi <i>et al.</i> 2023 .....	30
Tableau 4 : Produits manufacturés contenant des fibres de chrysotile de qualité inférieure (groupe 6 à 9).....	40
Tableau 5 : Résultats de Davinylair 2022 – concentrations moyennes en FCA et en fibres longues en fonction des techniques de nettoyage des DVA .....	44
Tableau 6 : Exemple fictif de caractérisation des amas .....	53

## Liste des figures

Figure 1 : Sélection des études d'intérêt sur les effets sanitaires des FCA.....	25
Figure 2 : Sélection des études d'intérêt relatives à la présence et à l'émissivité des FCA depuis les matériaux .....	35
Figure 3 : Faisceaux de fibres de chrysotile (Haute-Corse) (source : BRGM).....	36
Figure 4 : Faisceaux d'actinolite-amiante (Métabasaltes, Haute-Corse) (source : BRGM)....	37
Figure 5 : résultats de la campagne META de 2011 - concentrations médianes supérieures ou égales à 6 000 FCA/L en fonction des couples matériau traité et technique de retrait ou de traitement et concentrations en fibres longues correspondantes (d'après INRS 2011) .....	41
Figure 6 : résultats de la campagne INRS 2022 - concentrations moyennes $\geq$ 6 000 FCA/L pour les chantiers de niveau 2 (mesures individuelles).....	42
Figure 7 : résultats de la campagne INRS 2022 - concentrations moyennes $\geq$ 6 000 FCA/L pour les chantiers de niveau 3 (mesures individuelles).....	42
Figure 8 : Définition du terme "amas de fibres" à partir des terminologies employées dans les normes et proposition de règle de décision .....	51
Figure 9 : Typologie des structures de fibres rencontrées dans les analyses .....	52
Figure 10 : représentation schématique des diamètres de Féret appliqués à un amas ayant les dimensions d'une fibre longue (source : adapté de Hosdez, 2017).....	52

# 1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

## 1.1 Contexte

L'Anses a été saisie en novembre 2022 par la Direction Générale du Travail (DGT) sur la question des fibres courtes d'amiante (FCA) en milieu professionnel. Cette saisine fait suite à la publication par l'Anses en novembre 2022 d'un rapport d'expertise relatif à une mise à jour des données sanitaires et des données d'exposition aux fibres courtes d'amiante (FCA) depuis 2009, date à laquelle l'Anses avait publié une première expertise sur le sujet des FCA (Anses 2009, 2022). L'expertise de 2022 prenait également en compte les données relatives aux particules minérales allongées d'intérêt (PMAi) courtes (Anses 2022).

L'expertise de 2022 a confirmé, en milieu professionnel, une exposition majoritaire aux FCA/PMAi courtes, ainsi que des concentrations en FCA/PMAi courtes pouvant être très élevées. En environnement général intérieur, la présence de FCA a été identifiée dans près de la moitié des environnements investigués sans détecter de fibres longues dans 1/3 de ces situations (CSTB 2013). L'expertise a également souligné le fait qu'il n'existe pas de protocole harmonisé de comptage des FCA/PMAi courtes, et les travaux expertisés précisent rarement les critères de comptage appliqués. Chez l'humain, la mise à jour des données a permis d'identifier quelques données supplémentaires qui vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA/PMAi courtes, avec toutefois des difficultés d'interprétation. De même, les données de biométrie, bien que confirmant la part importante représentée par les FCA/PMAi courtes dans des échantillons pulmonaires de travailleurs, par rapport à l'ensemble des fibres/PMAi identifiées, n'ont pas apporté d'éléments sur la pathogénicité des FCA/PMAi courtes. Chez l'animal, les nouvelles données étaient trop peu nombreuses pour permettre une conclusion robuste sur la toxicité intrinsèque des FCA/PMAi courtes. Au final, ces nouvelles données ne permettaient pas, tout comme cela avait été conclu en 2009, d'envisager la construction d'une relation dose-réponse et la réalisation d'une évaluation des risques sanitaires (ERS) pour les FCA/PMAi courtes.

## 1.2 Objet de la saisine

### 1.2.1 Objet de la demande

Suite aux recommandations de l'Anses de 2022, et afin de préparer un éventuel travail réglementaire, la DGT a saisi l'Anses le 23 novembre 2022 sur le sujet de la dangerosité, de l'émissivité et de la métrologie des FCA en milieu professionnel.

Les demandes adressées par la DGT sont les suivantes :

1. Apporter des éclaircissements *via* une analyse bibliométrique de la littérature existante, sur le niveau de dangerosité des FCA en environnement professionnel. A défaut de pouvoir conclure sur ce sujet, il est demandé de détailler les méthodes permettant d'évaluer précisément la dangerosité des FCA pour les travailleurs exposés.

2. Proposer des préconisations techniques relatives au mesurage des FCA (en termes de stratégie d'échantillonnage, de modalités de prélèvements et d'analyse des FCA), que ce soit :
  - ✓ Pour les mesurages portant sur la réalisation de processus ou de phases opérationnelles émettant des FCA
  - ✓ Pour les mesurages environnementaux effectués durant la réalisation de travaux exposant aux FCA par application des dispositions des articles R 4412-124 et R 4412-128 du code du travail.
3. Fournir des données sur le niveau d'émissivité des FCA en documentant les listes les plus complètes possibles :
  - a. Des catégories d'objets géologiques ainsi que des familles de matériaux et produits manufacturés susceptibles de comporter un nombre important de FCA ;
  - b. Des types de techniques et modes opératoires susceptibles de favoriser, lorsque mis en œuvre, une émission de FCA, si possible en identifiant les techniques et modes opératoires les plus émissifs en FCA ;
  - c. Des moyens de protection collective (MPC) susceptibles d'abaisser efficacement la concentration en FCA au poste de travail de l'opérateur mettant en œuvre le processus considéré.Ces listes devront permettre de recouvrir les différentes situations de travail pouvant conduire, en pratique, à l'exposition des travailleurs aux FCA.
4. Fournir des indications sur la manière de prendre en compte les FCA pour redéfinir les niveaux réglementaires d'empoussièrtements à l'amiante fixés à l'article R 4412-98 du code du travail. Ces indications devront intégrer une éventuelle variation de la VLEP-8h actuelle dès lors que celle-ci devrait intégrer le décompte des FCA.

**Dans sa saisine, la DGT a précisé que ses questions portent exclusivement sur les FCA des 6 espèces minérales réglementées, et ne concernent pas les PMAi courtes.**

Concernant la 1<sup>ère</sup> demande, il a été précisé par l'Anses que la question des effets sanitaires des FCA a été traitée dans l'expertise Anses publiée en 2022. Cette expertise incluait une analyse des données épidémiologiques en environnement professionnel. Il ne sera pas réalisé d'analyse bibliométrique mais une synthèse des conclusions du rapport de 2022 portant spécifiquement sur le danger des FCA en environnement professionnel complétée, le cas échéant, par les nouvelles études publiées.

Concernant la 2<sup>ème</sup> demande, l'Anses a apporté en 2022 des éléments relatifs au comptage des FCA. L'Anses fournira un cahier des charges technique pour la réalisation des mesures : stratégie, méthodes de mesure à mettre en œuvre (prélèvement et analyse), mais ne proposera pas de protocole d'analyse des FCA, la mise au point et la validation de tels protocoles ne relevant pas de ses missions.

La 3<sup>ème</sup> demande n'a pas nécessité de précisions.

Concernant la 4<sup>ème</sup> demande, il a été précisé par l'Anses que l'ampleur du traitement de cette question dépendait :

- D'une part, des conclusions et recommandations techniques et scientifiques qui seront apportées en réponse aux 3 premières demandes ;
- D'autre part, des études en cours pour la détermination des Facteurs de Protection Assignés (FPA) de différents appareils de protection respiratoires (APR).

## 1.2.2 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au groupe de travail « Fibres courtes d'amiante en milieu professionnel », rattaché au comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés à l'air » l'instruction de cette saisine.

M. Didier Lahondère a été nommé rapporteur pour le traitement d'une partie de la question 3 relative aux catégories d'objets géologiques et aux familles de matériaux susceptibles de comporter un nombre important de FCA, ainsi qu'à leur émissivité en FCA.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

## 1.3 Prévention des risques de conflits d'intérêts

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet <https://dpi.sante.gouv.fr/>.

## 2 Terminologie

Les définitions présentées dans ce rapport sont issues des expertises Anses relatives aux « Fibres courtes et fibres fines d'amiante », aux « Fragments de clivage » et aux « Particules minérales allongées » (Anses 2009a ; Anses 2015 ; Anses 2017a).

### Amiante

L'amiante est un terme commercial qui décrit six minéraux naturels, des silicates hydratés, répartis en deux groupes : les serpentines et les amphiboles. Sa valeur commerciale lui est conférée par différentes propriétés particulières, telles que : faible conductivité électrique et thermique, bonne stabilité chimique, durabilité, haute résistance à la traction, flexibilité, etc. Il existe une certaine confusion associée à la terminologie « amiante » entretenue par les difficultés d'identification des différentes fibres. En effet, plusieurs silicates peuvent se présenter sous deux formes : asbestiforme et non asbestiforme. Le tableau ci-dessous donne la liste des six minéraux silicatés asbestiformes réglementés en tant qu'« amiante » et celle de leurs homologues non asbestiformes et donc non concernés par cette réglementation, avec leurs compositions chimiques et leurs numéros CAS. Dans le groupe des amphiboles, les formes asbestiformes et non asbestiformes de la trémolite, de l'actinolite et de l'anthophyllite ne portent pas un nom différent ; c'est pourquoi, dans différents textes, le terme amiante ou asbestiforme est ajouté au nom du minéral. Le minéral asbestiforme et son équivalent non asbestiforme ont la même composition chimique, mais ils diffèrent par leur mode de croissance cristalline, « unidimensionnel » pour les minéraux asbestiformes et « bidimensionnel » ou « tridimensionnel » pour les minéraux non asbestiformes.

Une structure fibreuse est définie dans la norme NFX 43-050 comme une « fibre individuelle, un faisceau de fibres, un agglomérat ou matrice composite ou un groupement contigu de fibres avec ou sans particules associées. Une structure fibreuse composée d'amiante est appelée « structure d'amiante ».

**Tableau 1 : Minéraux amiantes et leurs homologues non amiantes : composition chimique et numéro CAS**

Variétés amiantes (N° CAS)	Composition chimique	Espèces chimiquement équivalentes, non amiantes (N° CAS)
<b>Groupe des serpentines</b>		
Chrysotile (12001-29-5)	$[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]$	Antigorite (12135-86-3) Lizardite (12161-84-1)
<b>Groupe des amphiboles</b>		
Amiante actinolite (77536-66-4)	$[Ca_2(Mg,Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2]$ Condition : $0,5 \leq Mg/(Mg + Fe^{2+}) < 0,9$	Actinolite (13768-00-8)
Amiante anthophyllite (77536-67-5)	$[(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]$ Condition : $Mg > Fe^{2+}$	Anthophyllite (17068-78-9) Cumingtonite (CAS non identifié)
Amiante trémolite (77536-68-6)	$[Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2]$ Condition : $Mg/(Mg + Fe^{2+}) \geq 0,9$	Trémolite (14567-73-8)
Amosite (12172-73-5)	$[(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]$ Condition : $Fe^{2+} > Mg$	Grunerite (14567-61-4)
Crocidolite (12001-28-4)	$Na_2(Fe^{2+},Mg)_3Fe^{3+}_2Si_8O_{22}(OH)_2$	Riébeckite (17787-87-0)

Ainsi, en Europe, le terme « amiante » fait référence aux fibres asbestiformes.

### Asbestiforme :

Le terme asbestiforme fait référence à une morphologie (faciès) provenant d'une cristallisation naturelle et unidimensionnelle d'un minéral donnant des fibres ayant l'apparence de cheveux (fibres longues et filiformes). Cette morphologie confère au minéral des caractéristiques particulières dont un rapport d'allongement élevé, et dans certains cas, des propriétés mécaniques accrues (dont la résistance, la flexibilité et la durabilité). Ces fibres sont rassemblées dans des agglomérats ou des faisceaux pouvant facilement se séparer en plus petites fibres (fibrilles). Cet effet est à la base de la terminologie « poly-filamenteux » qui correspond à la caractéristique la plus importante de l'amiante (MSHA 2005). Quand une pression est appliquée sur une fibre asbestiforme, elle plie plutôt qu'elle ne se brise. Le terme asbestiforme n'a pas été défini pour des besoins réglementaires. Il dépend du processus de croissance du cristal (Anses 2015). Dans la norme ISO 22262-1 (2012), le terme « Asbestiforme » définit « un type de fibrosité minérale spécifique dans lequel les fibres et les fibrilles possèdent une résistance à la traction et une flexibilité élevées ».

**Fibre<sup>1</sup>**

Une fibre se définit comme une particule ayant un rapport longueur/diamètre (L/D)<sup>2</sup> supérieur à 3, et des côtés approximativement parallèles. Le rapport L/D > 3 est essentiellement basé sur un consensus établi par les hygiénistes. Les minéralogistes préfèrent souvent utiliser un rapport de 5, voire de 10, pour caractériser une fibre (Inserm 1999).

Fibre OMS (Organisation Mondiale de la Santé) : Les caractéristiques des fibres prises en compte pour la mesure de la concentration en nombre de fibres dans l'air par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) sont définies par une méthode OMS de référence (OMS 1998). La fibre se présente comme toute particule solide, naturelle ou artificielle, allongée à bords parallèles, ayant un diamètre inférieur à 3 µm, une longueur supérieure à 5 µm et un rapport d'allongement supérieur à 3. A noter que la résolution du microscope optique limite l'observation à des fibres de diamètre supérieur à 0,2 µm.

Fibre réglementaire : Dans l'air, en France, l'arrêté du 19 août 2011 et l'arrêté du 14 août 2012<sup>3</sup> fixent respectivement les modalités de réalisation des mesures d'empoussièrement en fibres d'amiante dans les immeubles bâtis et les conditions de mesurage des niveaux d'empoussièrement et du contrôle du respect de la Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP) aux fibres d'amiante. Pour l'application de ces arrêtés, sont prises en compte « toutes les fibres d'amiante dont la longueur est supérieure à 5 micromètres, la largeur est inférieure à 3 micromètres et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3 » (L > 5 µm ; D < 3 µm ; L/D > 3). L'analyse des prélèvements est réalisée en microscopie électronique à transmission analytique (META). Ces arrêtés ont été modifiés par l'arrêté du 25 juillet 2022<sup>4</sup> pour mettre en œuvre la nouvelle version de la norme NF X 43-050 de 2021 relative à la détermination de la concentration en fibres d'amiante par META.

L'arrêté du 1<sup>er</sup> octobre 2019<sup>5</sup> fixe les critères dimensionnels à prendre en compte pour qualifier la présence d'amiante dans les matériaux. Pour l'application de cet arrêté, sont prises en compte les fibres d'amiante visées dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3 et la longueur est supérieure à 0,5 micromètre (L > 0,5 µm ; L/D > 3).

Autres définitions d'une fibre : Les critères dimensionnels considérés pour la définition des fibres varient selon les pays et organismes consultés, et les méthodes analytiques utilisées. En effet, certains organismes considèrent un rapport d'allongement minimal de 5.

---

<sup>1</sup> Selon les définitions, il est indiqué que le rapport d'allongement doit être strictement supérieur ou supérieur ou égal à 3. Un rapport d'allongement strictement supérieur à 3 est retenu par le groupe de travail, conformément à la définition réglementaire d'une fibre.

<sup>2</sup> Le terme rapport L/D est souvent remplacé par : rapport d'allongement, rapport d'élongation ou aspect ratio (AR).

<sup>3</sup> Arrêté du 19 août 2011 relatif aux modalités de réalisation des mesures d'empoussièrement dans les immeubles bâtis.

Arrêté du 14 août 2012 relatif aux conditions de mesurage des niveaux d'empoussièrement, aux conditions de contrôle du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle aux fibres d'amiante et aux conditions d'accréditation des organismes procédant à ces mesurages.

<sup>4</sup> Arrêté du 25 juillet 2022 fixant les conditions de certification des entreprises réalisant des travaux de retrait ou d'encapsulation d'amiante, de matériaux, d'équipements ou d'articles en contenant et les conditions d'accréditation des organismes certificateurs

<sup>5</sup> Arrêté du 1<sup>er</sup> octobre 2019 relatif aux modalités de réalisation des analyses de matériaux et produits susceptibles de contenir de l'amiante, aux conditions de compétences du personnel et d'accréditation des organismes procédant à ces analyses

**Fibres courtes d'amiante (FCA) et fibres fines d'amiante (FFA)**

Les différents types de fibres sont définies comme suit selon leurs caractéristiques dimensionnelles<sup>6</sup> :

Fibres courtes d'amiante (FCA) : Longueur (L)  $\leq 5 \mu\text{m}$ , Diamètre<sup>7</sup> (D)  $< 3 \mu\text{m}$  et rapport d'allongement (L/D)  $> 3$ .

Nb : la valeur minimale du rapport d'allongement implique qu'une FCA ne peut pas avoir un diamètre supérieur à  $1,667 \mu\text{m}$ .

Fibres fines d'amiante (FFA) : Longueur (L)  $> 5 \mu\text{m}$ , Diamètre (D)  $< 0,2 \mu\text{m}$  et rapport d'allongement (L/D)  $> 3$ .

**Dans la suite du rapport, le terme « fibres longues » est employé pour les fibres de plus de  $5 \mu\text{m}$  de longueur.**

La représentation des types de fibres d'amiante selon leurs caractéristiques dimensionnelles est disponible en Annexe 3.

**Non asbestiforme**

Le terme non asbestiforme se rapporte à tout minéral qui n'est pas asbestiforme. Les variétés minérales non asbestiformes ne se développent pas de façon unidimensionnelle en longues fibres, mais plutôt de façon bi ou tridimensionnelle. Lorsqu'une pression est appliquée sur des minéraux non asbestiformes, ces derniers peuvent se briser. Dans le cas des amphiboles, les fragments générés sont plus ou moins allongés et réguliers, leurs faces correspondant souvent à des plans de clivage (d'où l'appellation fréquente de « fragments de clivage »).

**Particule minérale allongée (PMA)**

Ce terme s'applique à toute particule minérale ayant un rapport d'allongement supérieur à 3 (NIOSH 2011).

Dans plusieurs publications, le terme PMA est employé sans distinction de la morphologie des particules.

**Particule minérale allongée d'intérêt (PMAi)**

PMA des espèces minérales suivantes : actinolite, anthophyllite/cummingtonite<sup>8</sup>, trémolite, amosite/grunérite, crocidolite/riébeckite, fluoro-édénite, winchite, richtérite, ériomite, chrysotile et antigorite.

**FCA/PMAi courtes**

Fibres courtes d'amiante et autres PMAi non amiante de longueur inférieure ou égale à  $5 \mu\text{m}$ ., de rapport d'allongement supérieur à 3 et de diamètre inférieur à  $3 \mu\text{m}$ .

---

<sup>6</sup> Dans l'expertise de 2009, un rapport d'allongement supérieur ou égal à 3 était retenu. Dorénavant, un rapport d'allongement strictement supérieur à 3 est retenu par le groupe de travail, conformément à la définition réglementaire d'une fibre. De même, dans l'expertise de 2009, une longueur strictement inférieure à  $5 \mu\text{m}$  avait été retenue pour définir les FCA. La longueur d'une fibre OMS étant strictement supérieure à  $5 \mu\text{m}$ , une longueur inférieure ou égale à  $5 \mu\text{m}$  est dorénavant retenue pour les FCA.

<sup>7</sup> Les termes diamètre, largeur et épaisseur sont utilisés indifféremment dans le rapport.

<sup>8</sup> La cummingtonite a été ajoutée à la liste des PMAi (cf. tableau 1).

## 3 Méthode générale de travail

### 3.1 Revue de la littérature

Les nouvelles publications concernant les FCA ont été recherchées sur les bases de données Pubmed et Scopus sur la période postérieure à 2021. L'équation de recherche est similaire à celle utilisée dans l'expertise de 2022 :

((*"short" OR "size" OR "dimension" OR "length"*) AND (*"asbestos" OR "chrysotile" OR "actinolite" OR "anthophyllite" OR "tremolite" OR "amosite" OR "crocidolite" OR "amphibole" OR "elongated mineral particle" OR "taconite" OR "vermiculite" OR "libby amphibole" OR "fluoroedenite"*))

Les champs de recherche suivants ont été utilisés :

- Scopus : recherche dans les mots du titre, du résumé et dans les mots clés (TITLE-ABS-KEY)
- Pubmed : recherche dans les mots du titre et du résumé (Textword)

La sélection des études d'intérêt est présentée dans les chapitres *ad hoc* du rapport.

### 3.2 Consultation d'organismes

Les organismes suivants ont été consultés afin de disposer d'informations complémentaires sur la mesure des FCA et l'émissivité des matériaux en FCA :

- BAuA (Institut fédéral allemand en matière de santé-travail), agence fédérale allemande pour la santé et la sécurité au travail, en lien avec son implication dans le projet du comité européen de normalisation CEN sur la détermination et la caractérisation microscopique des nano-objets, leurs agrégats et agglomérats aéroportés dans les environnements professionnels (CEN TC 137). Des informations sur les modalités de comptage des amas ont été transmises (cf. chapitre 6).
- CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment), pour son expertise en aérosols, nanoparticules, métrologie et prélèvements. Le CSTB a également contribué au PRDA (plan recherche et développement amiante) et notamment conduit le projet ORIGAMI (Outils de repérage interactif pour la gestion de l'amiante) qui a numérisé un nombre important de documents techniques sur l'amiante. Il développe une méthode d'analyse d'amiante *in situ* à l'aide de la spectroscopie Raman.
- Le HSE (Health and safety executive), organisme gouvernemental du Royaume-Uni, qui pilote différents essais interlaboratoires au niveau européen pour les laboratoires accrédités pour la recherche d'amiante dans les matériaux. Il dispose d'une expertise dans les techniques de dénombrement et de détermination de la granulométrie des fibres d'amiante.
- L'IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire), qui conduit des travaux en vue de la détermination de facteurs de protection assignés (FPA) pour les tenues étanches ventilées (TEV) et les heaumes ventilés (HV) lorsqu'utilisés pour des travaux exposant à l'amiante.

Les réponses transmises par ces organismes sont présentées en Annexe 4.

### 3.3 Bases de données

La base de données Scola<sup>9</sup> (Système de collecte des informations des organismes accrédités) recense les données issues des résultats des évaluations d'exposition professionnelles aux agents chimiques, dont l'amiante, réalisées par les organismes accrédités. Cette base de données, gérée par l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité), a été consultée au travers du rapport d'activité 2012-2022 (INRS 2023) afin d'identifier les situations d'exposition professionnelle à l'amiante fréquentes (matériaux traités et techniques mises en œuvre) (cf. chapitre 5.3.3)

### 3.4 Cadre normatif

Les normes existantes décrivant les méthodes d'échantillonnage, de prélèvement et d'analyse des fibres d'amiante réglementaires ont également été consultées :

- NF X43-269 (décembre 2017) : « Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META - Comptage par MOCP » ;
- NF X43-050 (juillet 2021) : « Qualité de l'air — Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission — Méthode indirecte » ;
- NF ISO 13794 (avril 2020) : « Air ambiant — Dosage des fibres d'amiante — Méthode par microscopie électronique à transmission par transfert indirect » ;
- NF ISO 10312 (mai 2020) : « Air ambiant — Dosage des fibres d'amiante — Méthode par microscopie électronique à transmission par transfert direct » ;
- NF EN ISO 16000-7 (septembre 2007) : « Air intérieur - Partie 7 : stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air » ;
- Fascicule de documentation FD X46-033 (mars 2023, a remplacé le guide GA X 46-033 d'août 2012) : « Stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air ».

### 3.5 Recherche de documents historiques sur l'amiante

Une recherche de différents documents techniques a été réalisée afin d'évaluer si certains procédés historiques d'extraction et de production d'amiante discriminaient les fibres selon leur taille. Au Canada, un rapport du gouvernement du Québec datant de 1973 sur l'amiante dans cette région a été retrouvé. Par ailleurs, le BRGM a publié en 1997 un « Memento roches et minéraux industriels – Amiante », où différents points sont détaillés comme la géologie, les gisements mais surtout l'exploitation, les propriétés et l'utilisation de l'amiante. Différentes classifications pour l'amiante y sont décrites. Un brevet américain de 1979 (référence US4287020A) sur les méthodes de préparation des produits à base d'amiante a également été identifié au cours de cette recherche. Le système de classification au Québec qui définit différents groupes de fibres de chrysotile et des utilisations spécifiques associées est notamment décrit.

---

<sup>9</sup> <https://scola.inrs.fr/>

## 4 Effets sanitaires des FCA

### 4.1 Rappel des paramètres influençant la toxicité de l'amiante

Les éléments présentés dans ce chapitre sont issus du rapport d'expertise Anses de 2009 sur les fibres courtes d'amiante et de la dernière monographie du CIRC (Centre international de recherche sur le cancer) sur l'amiante (Anses 2009 ; CIRC 2012).

Les mécanismes responsables des effets cancérigènes et fibrogènes de l'amiante sont complexes. Plusieurs paramètres influencent la toxicité de l'amiante : les dimensions des fibres, les propriétés de surface, les caractéristiques physico-chimiques, la surface spécifique, la composition chimique, la concentration atmosphérique au cours du temps et la dose (charge pulmonaire).

#### ▪ Dimensions des fibres

En raison de leur forme, les particules fibreuses présentent une spécificité de dépôt dans le poumon. Les dimensions des fibres affectent leur dépôt dans l'arbre respiratoire et leur élimination par les macrophages alvéolaires. Pour des raisons physiques et dynamiques, les particules les plus susceptibles d'être déposées dans le poumon profond ont un diamètre aérodynamique ( $D_{ae}$ ) moyen inférieur à  $5 \mu\text{m}^{10}$ .

Il a été démontré que les fibres sont phagocytées, non seulement par les macrophages, mais également par les cellules épithéliales (bronchiques, alvéolaires et mésothéliales). Il résulte de cette internalisation une stimulation de la réponse cellulaire au stress, ainsi que des perturbations de la mitose des cellules, mises en évidence dans de nombreux travaux. Les perturbations mitotiques sont d'autant plus importantes que l'échantillon comporte davantage de fibres longues. D'autre part, des études effectuées avec des macrophages ont montré que des fibres de petites dimensions étaient phagocytées par ces cellules, mais que la phagocytose des fibres longues pouvait être limitée. Cette phagocytose « frustrée », au cours de laquelle des facteurs toxiques pouvaient être secrétés, endommage le milieu environnant. Il est toutefois à noter qu'aucune limite de longueur n'a été clairement définie (Anses 2009). Une longueur comprise entre 10 et 20  $\mu\text{m}$  est généralement citée par les auteurs.

Le rôle des dimensions semble être différent pour les trois principales maladies liées à l'amiante (d'après CIRC 2012) : l'asbestose a été rapportée comme étant plus étroitement associée à la surface des fibres retenues, bien que la fibrose soit également corrélée avec les fibres  $> 2 \mu\text{m}$  de long, le mésothéliome est corrélé au nombre de fibres de plus de  $5 \mu\text{m}$  de long et plus fines que  $0,1 \mu\text{m}$ , et le cancer du poumon avec des fibres de plus de  $10 \mu\text{m}$  de long et de diamètre supérieur à  $0,15 \mu\text{m}$ . Cependant, le CIRC rapporte la présence de fibres courtes dans les tissus pulmonaires et pleuraux des patients atteints de mésothéliome malin, suggérant de ne pas exclure le rôle des fibres courtes ( $< 5 \mu\text{m}$ ) dans le développement des maladies liées à l'amiante (CIRC 2012).

#### ▪ Propriétés de surface

Les propriétés de surface des fibres influencent leur réactivité. Les irrégularités dans l'organisation poly-atomique de surface (« defects ») (Gualtieri *et al.* 2023) peuvent modifier cette réactivité. Un très grand nombre de travaux a porté sur les propriétés oxydo-réductrices ; elles sont associées à la présence de métaux, en particulier le fer, jouant un rôle de

---

<sup>10</sup>  $D_{ae} = nD\sqrt{D}$  ou  $D$  est le diamètre physique et  $D$  la densité

catalyseurs, susceptibles de générer des oxydants et des radicaux libres (espèces actives de l'oxygène, EAO). Ces molécules peuvent provoquer une lésion de l'acide désoxyribonucléique (ADN), en particulier une oxydation des bases. Ces effets apparaissent plus importants pour les fibres longues, comparativement aux fibres courtes, à quantité pondérale équivalente. Il est à noter que les observations d'une plus grande activité des fibres longues, comparativement aux fibres courtes, semblent paradoxales par rapport à l'hypothèse d'un rôle déterminant de la surface, en termes de surface disponible pour interagir avec les cellules. En effet, à masse équivalente, la superficie développée par des fibres courtes d'un échantillon de fibres d'amiante est supérieure à celle développée par des fibres longues, en raison des cassures et de la défibrillation. Il faut noter par ailleurs que la préparation des fibres courtes est susceptible de modifier leur réactivité de surface.

#### ▪ Composition chimique et biopersistance

Certains métaux font partie de la composition chimique des fibres. Ils peuvent être présents en tant qu'éléments métalliques contaminants associés naturellement aux fibres et non éliminés au cours de la préparation des échantillons pour l'expérimentation, mais ils peuvent également être apportés par cette préparation, par exemple au cours d'étapes de broyage (Anses 2009). Des molécules organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP) ont également été détectées à la surface des fibres. Finalement, la composition chimique des fibres intervient dans leur cinétique de dissolution dans le milieu pulmonaire : le chrysotile est moins biopersistant que les amphiboles, notamment aux pH acides rencontrés dans des compartiments particuliers (phagolysosomes) (Anses 2009).

*In fine*, le temps de résidence dans les poumons dépend à la fois de la clairance et des processus physico-chimiques. La clairance est principalement liée aux dimensions des fibres, tandis que la composition chimique, et les propriétés de surface affectent principalement la lixiviation, la dissolution et la fragmentation (CIRC 2012). Le nombre de fibres en rétention dans le poumon peut aussi évoluer en raison de la défibrillation des faisceaux de fibres comme cela a été rapporté expérimentalement (Cook *et al.* 1982 ; Coffin *et al.* 1983).

**En conclusion, il est clair que les études expérimentales montrent que les effets biologiques dépendent des dimensions des fibres et sont liés à leur forme, mais ces caractéristiques ne sont pas les seuls paramètres responsables de leur toxicité. D'autres paramètres comme la réactivité de surface, la composition chimique ou la biopersistance conditionnent l'interaction avec les cellules et/ou la réponse cellulaire et contribuent aux effets observés.**

**Il est possible que la présence de FCA en grand nombre puisse influencer la réponse biologique aux fibres longues, en particulier en modifiant la clairance des fibres longues, mais aussi en produisant des effets propres par des mécanismes d'action différents sur les macrophages (Leinardi *et al.* 2023).**

**Enfin, les FCA peuvent former des structures en amas et des faisceaux, dont le devenir dans l'organisme et les impacts biologiques ne sont pas documentés.**

## 4.2 Rappel des conclusions de l'Anses 2022

### 4.2.1 Données épidémiologiques

Les études épidémiologiques expertisées par l'Anses en 2022 sont présentées en Annexe 5. Ces données montraient des effets sur la santé dans les populations professionnelles exposées majoritairement aux FCA, et pour les études sur les mines de taconite, aux PMAi courtes. Certaines études montraient que, parmi les différentes classes de fibres courtes, c'est pour les fibres fines et courtes ( $D < 0,25 \mu\text{m}$  et  $L \leq 1,5 \mu\text{m}$  ou  $L$  compris entre 1,5 et 5  $\mu\text{m}$ ) qu'était observée la plus importante augmentation du risque de cancer du poumon. Ces études apportaient des éléments nouveaux sur la distribution et les caractéristiques granulométriques de ces fibres, mais ces données n'ont pas permis de conclure formellement à l'existence d'effets sanitaires associés. Ces études n'ont pas permis non plus de savoir si les effets sanitaires observés sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre aux fibres courtes.

### 4.2.2 Données expérimentales

Les études expérimentales analysées par l'Anses en 2022 sont présentées en Annexe 6.

Les données expérimentales analysées en 2022 étaient trop peu nombreuses pour permettre une conclusion solide sur la toxicité intrinsèque des FCA.

Ces données confirmaient les propositions déjà formulées en 2009 sur le potentiel toxique des fibres en fonction de leurs dimensions. Un effet biologique potentiel des FCA était suggéré. Cela reposait, tant sur des études expérimentales que sur les connaissances du mécanisme d'action des fibres d'amiante (internalisation par les cellules, biopersistance, caractéristiques physico-chimiques en relation avec un effet biologique).

Il n'avait pas été identifié de nouvelles études permettant d'évaluer la cancérogénicité des FCA.

### 4.2.3 Données issues du PNSM et du RNV3P

Les données issues du Programme National de Surveillance du Mésothéliome (PNSM) et du RNV3P (Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles) ont été analysées en 2022 dans l'objectif d'identifier des pathologies liées à l'amiante chez des agents de service hospitalier (ASH), étant donné que cette profession peut être exposée à des FCA *via* le passage de monobrosse sur des dalles de sol vinyl-amiante (DVA), matériaux essentiellement composés de fibres d'amiante de faible longueur.

S'agissant du PNSM, une étude préliminaire conduite en 2019 en collaboration avec Santé Publique France (SPF) (dans le cadre d'un stage de Master 1) suggérait que l'incidence du mésothéliome pleural chez les ASH, sans exposition professionnelle autre que l'utilisation de monobrosse sur des DVA, était supérieure à l'incidence attendue en l'absence d'exposition à l'amiante. Cette étude devait être poursuivie pour confirmer ces résultats (cf. chapitre 5.2).

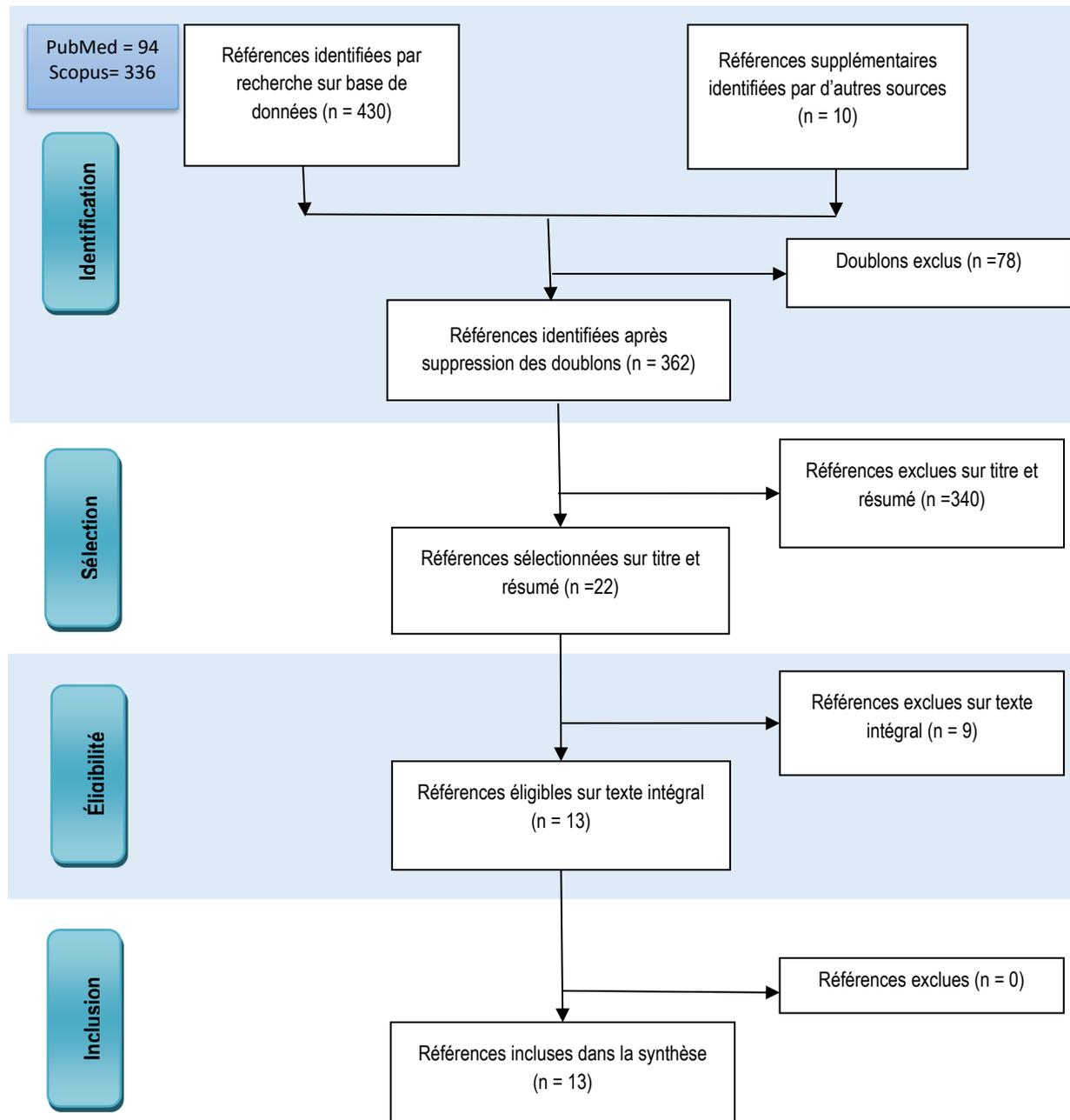
Pour le RNV3P, sur la période 2001-2019, il n'était pas retrouvé de pathologies liées à une exposition à l'amiante parmi les sujets ( $n=10$ ) exerçant la profession d'agent d'entretien en milieu hospitalier.

## 4.3 Nouvelles données disponibles

### 4.3.1 Méthode de travail

La méthode d'identification des nouvelles publications concernant les effets sanitaires des FCA est présentée en chapitre 3.1.

La sélection des études d'intérêt sur les effets sanitaires des FCA est présentée en Figure 1.



**Figure 1 : Sélection des études d'intérêt sur les effets sanitaires des FCA**

L'Annexe 7 liste l'ensemble des références éligibles sur texte intégral et le motif d'exclusion le cas échéant.

Les études publiées dans la littérature scientifique ont été revues par deux experts du groupe de travail. Au total, 13 études ont été incluses dans la synthèse.

Les revues de la littérature ont été analysées à l'aide de l'outil AMSTAR2 (A Measurement Tool to Assess Systematic Reviews), un outil de mesure servant à évaluer la qualité méthodologique des revues systématiques (Shea *et al.* 2017). La cotation AMSTAR2 consiste en une grille d'analyse de 16 éléments, lesquels consistent en une brève question d'une phrase et des directives additionnelles concernant le choix de réponses (« oui », « oui partiel » et « non ») (Shea *et al.* 2017). La liste des questions est présentée en Annexe 8. L'objectif de cette analyse est d'évaluer et de discuter la confiance globale dans les résultats de la revue. En fonction des réponses aux 16 questions, la confiance dans les résultats de la revue est déclinée en 4 niveaux :

- Forte : aucune faiblesse, ou faiblesse non importante : la revue systématique offre un résumé exact et complet des résultats des études disponibles qui se penchent sur la question à l'étude ;
- Modérée : plus d'une faiblesse non importante : la revue systématique contient plus d'une faiblesse, mais aucun défaut grave. Elle peut offrir un résumé exact des résultats des études disponibles qui se penchent sur la question à l'étude ;
- Faible : un défaut grave: la revue contient un défaut grave et pourrait ne pas offrir un résumé exact et complet des études disponibles qui se penchent sur la question à l'étude ;
- Très faible : plus d'un défaut grave: la revue contient plus d'un défaut grave et n'offre pas un résumé exact et complet des études disponibles.

#### 4.3.2 Analyse des nouvelles études publiées dans la littérature scientifique

##### ▪ Revue de la littérature sur les effets sanitaires des FCA

Une revue de la littérature sur les effets sanitaires des FCA a été identifiée (Bernstein 2022). Cette revue, qui s'appuie sur une analyse des données épidémiologiques et expérimentales *in vivo* et *in vitro*, conclut que les FCA de chrysotile et d'amphiboles de longueur inférieure à 5-10  $\mu\text{m}$ , bien que présentes dans la plupart des expositions professionnelles ou environnementales, ne contribuent pas aux effets sur la santé de l'amiante.

Cette revue a été analysée à l'aide de la grille AMSTAR 2 par deux experts du groupe de travail. La confiance dans les résultats de cette revue est qualifiée de « très faible » (cf. Annexe 8). En particulier, la sélection des publications discutées dans la revue est mal définie.

Le groupe de travail souligne que cette revue n'apporte pas d'éléments nouveaux par rapport aux précédentes revues de la littérature. Il est à noter que dans cette étude, les critères de dimensions discutés par l'auteur sont les suivants :

- FCA :  $L \leq 5-10 \mu\text{m}$  ;
- Fibres longues d'amiante :  $L > 10-20 \mu\text{m}$

Cela modifie quelque peu les conclusions habituelles sur les FCA qui, généralement, font référence aux fibres de longueur inférieure à 5  $\mu\text{m}$ , et étendrait, d'après les auteurs, l'innocuité aux fibres jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  de longueur.

Par ailleurs, le groupe de travail souligne que la focalisation de l'auteur sur la biopersistance *in vivo* limite la réflexion sur les mécanismes d'action des fibres et en particulier occulte les mécanismes génétiques et épigénétiques de la cancérogenèse. Pour les études *in vivo*,

l'auteur ne considère pas le(s) mécanisme(s) biologiques(s) associé(s) aux pathologies liées à l'exposition à l'amiante. En revanche, il mentionne les mécanismes dans les études *in vitro* sur cellules, mais celles-ci sont considérées comme non pertinentes, en particulier en raison du défaut d'évaluation de la biopersistence. Cependant, le groupe de travail considère que ces études sont un apport à la connaissance dans différents domaines, tels que les processus de défense (phagocytose), l'inflammation, la génotoxicité et l'impact sur les modifications des voies de régulation cellulaires.

Dans certaines études, le rôle des FCA dans les pathologies pulmonaires de l'amiante est attesté par une évaluation quantitative des FCA. L'auteur conteste ce mode d'expression car, en raison de la distribution log normale des fibres dans les aérosols, on trouve une plus forte proportion de FCA dans le poumon comparativement aux fibres longues.

Enfin, la conclusion de l'auteur de l'absence de contribution des FCA aux effets sur la santé de l'amiante, est en désaccord avec la littérature publiée sur ce sujet. En effet, si la plupart des études concluent que la toxicité des FCA est moindre comparativement aux fibres longues, très peu concluent avec certitude sur l'absence d'effets des FCA. Au total si cette revue conclue à l'absence d'effet des FCA, le groupe de travail considère qu'elle présente plusieurs limites qui ne permettent pas d'endosser une telle conclusion

- **Données issues d'une étude de modélisation du développement du mésothéliome et du cancer du poumon dans des cohortes de travailleurs exposés**

Deux études de modélisation du développement du mésothéliome et du cancer du poumon réalisées par la même équipe ont été identifiées dans la littérature (Korchevskiy et Wylie, 2022 ; Wylie et Korchevskiy, 2023). Ces études exploitent une base de données issues de différentes cohortes épidémiologiques, pour lesquelles des informations sur le risque de mésothéliome et de cancer du poumon, et des informations détaillées sur les caractéristiques dimensionnelles de fibres d'amiante auxquelles ont été exposés les sujets sont disponibles. Les auteurs évaluent les corrélations entre des facteurs de cancérogénicité publiés et de nombreux facteurs dimensionnels des fibres pour en déduire un modèle prédictif de la cancérogénicité.

Le premier article (Korchevskiy et Wylie, 2022) vise à identifier les caractéristiques dimensionnelles des fibres d'amphiboles les plus pertinentes pour prédire les facteurs de cancérogénicité pour le mésothéliome ( $R_M$ ) et le cancer du poumon ( $R_L$ ).

La plupart des analyses sont limitées aux fibres de longueur strictement supérieure à 2  $\mu\text{m}$  ( $L > 2 \mu\text{m}$ ) et de rapport d'allongement supérieur ou égal à 3 ( $L/D \geq 3$ ). Différents paramètres dimensionnels sont calculés par les auteurs, dont certains ne concernent de fait que les fibres de longueur supérieure à 5  $\mu\text{m}$ . Les auteurs ne présentent pas de résultats concernant spécifiquement les fibres de longueur inférieure à 5  $\mu\text{m}$  ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ).

Les résultats de l'étude montrent que le paramètre le plus corrélé au facteur de cancérogénicité pour le mésothéliome est la surface spécifique par unité de volume ( $S/V$ ). Pour le cancer du poumon, la plus forte corrélation est observée avec le rapport d'allongement ( $L/D$ ).

Des modèles de régression linéaire en sont dérivés. L'application de ces équations par le groupe de travail montre qu'une exposition exclusive à des FCA ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ) peut être associée à un potentiel cancérogène non nul ( $R_M$  et/ou  $R_L > 0$ ) dès lors que les fibres sont suffisamment fines. Par exemple, pour des fibres d'une longueur de 3  $\mu\text{m}$ ,  $R_L$  (respectivement  $R_M$ ) sont supérieurs à 0 dès que le diamètre est inférieur à 0,5  $\mu\text{m}$  (respectivement 0,6  $\mu\text{m}$ ).

Le second article est un article de revue, qui reprend principalement les résultats des études publiées antérieurement par la même équipe, avec quelques calculs supplémentaires (Wylie et Korchevskiy, 2023). Les résultats de l'étude indiquent que le diamètre des fibres est un meilleur prédicteur du risque de mésothéliome que la longueur des fibres. La conclusion des auteurs selon laquelle les FCA ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ) ne contribuent pas au risque de cancer s'appuie sur le fait que pour cette catégorie de fibres, aucun coefficient de corrélation avec le facteur de cancérogénéité du mésothéliome ( $R_M$ ) n'est statistiquement significatif. Cependant les valeurs des coefficients de corrélations ne sont pas indiquées par les auteurs, et le fait que les résultats soient significatifs ou non ne reflète que la puissance statistique. Enfin, il est dit que les particules de moins de  $5 \mu\text{m}$  ne contribuent pas significativement au risque de cancer en général, alors que les calculs n'ont pas été effectués pour le cancer du poumon.

**Cette conclusion que les fibres dont la longueur est inférieure à  $5 \mu\text{m}$  quel que soit leur diamètre ne semble pas avoir d'impact sur le risque de cancer n'est donc pas complètement justifiée par les résultats.**

Dans la suite de l'article, la plupart des calculs présentés ne concernent que les fibres de longueur supérieure à  $5 \mu\text{m}$  ( $L > 5 \mu\text{m}$ ). Différentes équations permettant de prédire  $R_M$  et  $R_L$  sont cependant présentées. Certains modèles ne s'appliquent de fait qu'aux fibres de longueur supérieure à  $5 \mu\text{m}$  ( $L > 5 \mu\text{m}$ ), d'autres peuvent en principe être utilisés pour toutes les longueurs et diamètres. L'application de ces équations montre ici aussi qu'en théorie des fibres d'une longueur inférieure à  $5 \mu\text{m}$  sont associées à un potentiel cancérogène non nul, si leur diamètre est faible.

#### ▪ Etudes expérimentales

**Deux nouvelles études ont été identifiées dans la littérature (Gualtieri *et al.* 2023 ; Leinradi *et al.* 2023).**

L'objectif de l'étude de Gualtieri *et al.* 2023 était de comparer la toxicité d'échantillons de fibres longues ( $L > 5 \mu\text{m}$ ) et courtes ( $L \leq 5 \mu\text{m}$ ) de chrysotile issues d'un échantillon commercial de Russie, en utilisant comme témoin positif un échantillon de crocidolite UICC et comme témoin négatif un échantillon de Wollastonite NYAD G.

Cette étude s'appuie sur :

- une approche théorique via le calcul d'un indice de toxicité potentielle FPTI (Fiber Potential Toxicity Index) selon une méthode décrite par Gualtieri (2018). Le FPTI est calculé en prenant en compte plusieurs paramètres physico-chimiques (par exemple contenu en fer et état de valence, potentiel zéta), morphologiques (tels que la longueur, le diamètre, la forme cristalline, la courbure du cristal), d'activité de surface (tel que la production de radicaux libres) et de biodurabilité afin d'évaluer la probabilité qu'une fibre engendre des effets toxiques. Plus l'indice est élevé, plus le potentiel de toxicité de la fibre est supposé élevé.
- la réalisation de tests de toxicité *in vitro* de cytotoxicité et d'activation de systèmes d'oxydo-réduction (production d'espèces réactives de l'oxygène – ROS).

Les échantillons de chrysotile ont été préparés par broyage cryogénique et séparation des dimensions selon la méthode décrite par Scognamiglio *et al.* 2021. La détermination de la longueur (fibres isolées et faisceaux) est effectuée sur image en SEM (500-2000x). Les dimensions des échantillons sont présentées dans le Tableau 2. A noter que l'échantillon de chrysotile court n'est pas exempt de fibres de longueur supérieure à  $5 \mu\text{m}$  et en contient moins de 5 %.

**Tableau 2 : Dimensions des fibres des échantillons testés dans l'étude de Gualtieri et al. 2023**

Longueur (µm)	Echantillon chrysotile long	Echantillon chrysotile court	Echantillon crocidolite UICC	Echantillon wollastonite NYAD G
0-5	<b>9,43%</b>	<b>95,2%</b>	-	-
5-10	21,7%	1,08%	-	-
10-15	11,3%	1,61%	-	-
15-20	8,49%	0,54%	-	-
>20	<b>49,1%</b>	1,61%	-	-
Moyenne (µm)	29,80	1,91	18	46,6
Maximum (µm)	<b>159,8</b>	<b>22,1</b>	-	-
Minimum (µm)	<b>1,45</b>	<b>0,25</b>	-	-
Écart type	3,08	0,21	1	-
Nb fibres	100	200	-	-
Diamètre moyen (µm)	0,4 ± 1	0,15±7	0,35±1	3,74
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)	28,9±1,2	30,3±1,0	16,1±8	0,50±1

Les résultats des tests de cytotoxicité montrent une activité de tous les échantillons, y compris de l'échantillon de wollastonite. Les tests ont révélé un effet cytotoxique du chrysotile long supérieur à celui du chrysotile court (des différences peuvent toutefois exister, selon le type de cellules et la durée d'incubation). Le bilan des tests *in vitro* effectué au moyen du calcul d'un score<sup>11</sup> à partir des valeurs témoins (100 %) montre que le score de toxicité va dans le sens crocidolite (score = 0,67±0,28) > chrysotile long (score = 0,66±0,07) > chrysotile court (score = 0,43±0,05) > wollastonite (score = 0,25±0,05). Les résultats de FPTI sont en accord avec des scores de cytotoxicité (crocidolite (2,67) > chrysotile long (2,35) > chrysotile court (2,18) > wollastonite (1,92-2,12)).

En conclusion, cette étude montre qu'un échantillon de fibres longues de chrysotile est plus actif qu'un échantillon de fibres courtes de chrysotile mais que ce dernier n'est pas dépourvu d'effets biologiques sur cellules et est actif (ROS) dans un système acellulaire.

L'étude de Leinardi *et al.* (2023) est une étude *in vitro* qui avait pour objectifs de comparer les effets d'échantillons de fibres courtes et longues d'amosite sur la cytotoxicité, l'inflammation et les mécanismes de mort cellulaire. Les dimensions des fibres des échantillons testés sont présentées dans le Tableau 3. A noter que 50 % des fibres de l'échantillon de fibres longues ont une longueur inférieure à 5 µm.

<sup>11</sup> L'auteur a réalisé un bilan des tests *in vitro* par le calcul d'un score calculé par la moyenne des déviations standard normalisés ( $D_i$ ) de chaque valeur de la mesure de la toxicité *in vitro* mesurée à partir des valeurs témoins (100 %)

**Tableau 3 : Dimensions des fibres des échantillons testés dans l'étude de Leinardi et al. 2023**

Caractéristiques des échantillons	Echantillon d'amosite court	Echantillon d'amosite long
Longueur des fibres ( $\mu\text{m}$ )		
P25	0,5	3,0
P50	1,0	5,0
P75	1,5	9,0
Surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	11	6,0

Cette étude a mis en évidence des mécanismes différents entre les fibres courtes et les fibres longues sur les mécanismes de mort cellulaire : les fibres courtes d'amosite induisent une mort cellulaire par pyroptose (mort cellulaire lytique immunogène) qui passe par l'activation (clivage) de GSDMD<sup>12</sup>, la production d'IL-1 $\alpha$ , et l'implication du récepteur Toll-like 4 (TLR4), tandis que les fibres longues d'amosite induisent une mort cellulaire par « apoptose indirecte », qui passe par la production et d'IL-1 $\alpha$ , de TNF- $\alpha$  via l'activation de caspases-3/-7 et TLR4, de ROS et de « scavenger receptors<sup>13</sup> ». Ces différences résultent, selon les auteurs, des différences de dimensions et des propriétés de surface (celles-ci dépendant probablement du processus de sélection des fibres courtes d'amosite). Ils associent les différences de mécanisme de mort cellulaire à une différence d'internalisation des fibres, les fibres courtes d'amosite étant internalisées et les fibres longues d'amosite ne l'étant pas.

Les auteurs concluent que les fibres courtes d'amosite sont biologiquement actives *in vitro* et que leurs effets inflammatoires peuvent avoir une signification *in vivo* qui ne devrait pas être sous-estimée. Le groupe de travail souligne que dans la littérature, les études *in vivo* montrent un effet fibrosant et cancérigène différent entre les FCA et les fibres longues. Cela peut être aussi associé aux mécanismes de clairance et à d'autres mécanismes d'importance (génétoxicité par exemple) rapportés.

## 4.4 Méthode permettant d'évaluer le danger des FCA en milieu professionnel

### 4.4.1 Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser une étude épidémiologique

La principale limite des études épidémiologiques identifiées dans la littérature jusqu'à présent pour étudier les effets des FCA est le fait que les populations sont majoritairement exposées à des mélanges de FCA et de fibres longues d'amiante, sans qu'il soit possible de savoir si les effets sanitaires observés sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre aux fibres courtes. Pour évaluer le risque associé aux FCA, il est nécessaire d'identifier des

<sup>12</sup> Gasdermin D : protéine activée qui déclenche la mort cellulaire pyroptotique

<sup>13</sup> Famille de récepteurs membranaires de la surface des macrophages qui reconnaissent des ligands (tels que protéines, bactéries, pathogènes) permettant leur dégradation et leur capture.

populations de travailleurs exposés exclusivement (ou quasi exclusivement) aux FCA, et n'ayant pas été exposés à des fibres longues d'amianté au cours de leur carrière professionnelle. A ce jour, la seule population identifiée de travailleurs exposés quasi-exclusivement aux FCA sont les travailleurs exposés durant le nettoyage des dalles de sol en vinyle amianté (DVA) par des monobrosses. Parmi ces travailleurs, les agents de service hospitalier (ASH) ne sont habituellement exposés à l'amianté lors de leur activité professionnelle que durant le nettoyage des DVA.

Les trois études menées successivement par le LAFP ont montré que les personnels réalisant des opérations d'entretien de DVA, comme les ASH, étaient exposés quasi-exclusivement aux FCA (DGS 2014, DGS-LAFP-CRAMIF-INRS-CTIP, 2019, LAFP 2023).

Parallèlement à l'objectif principal d'acquisition de données d'exposition, le projet Davinylair avait pour objectif associé « d'évaluer les populations concernées en faisant, dans une zone géographique donnée, l'inventaire des bâtiments concernés recevant du public ainsi que leurs caractéristiques (nature, fonction, surface, état macroscopique) à partir des dossiers techniques amianté (DTA) ainsi que d'estimer des groupes de population réalisant ou ayant réalisé des opérations d'entretien de DVA (agents de nettoyage salariés des structures gérant les bâtiments, entreprises de nettoyage intervenant comme prestataires externes, occupants des locaux) dans la même zone géographique. Il était proposé d'en déduire les déterminants des expositions afin de construire une grille d'évaluation des expositions lors des reconstitutions de carrière des sujets inclus dans les études épidémiologiques et lors de la surveillance médicale des sujets suivis en médecine du travail ou lors du suivi post professionnel. Enfin, il était souhaité d'évaluer la faisabilité de la constitution d'une cohorte d'agents de nettoyage dans une situation homogène d'exposition observée dans l'inventaire des bâtiments (par exemple les agents de service hospitaliers dans les établissements de santé) pour la mise en place d'un protocole de surveillance médicale spécifique » (LAFP 2023).

- Constitution d'une cohorte de travailleurs exposés exclusivement aux FCA

Les résultats du projet Davinylair ont montré la difficulté à constituer une cohorte d'ASH compte tenu de l'évolution des pratiques dans les hôpitaux. En effet, si l'identification des établissements concernés par les DVA est réalisable, le recensement des personnels ayant été ou étant exposés à l'amianté *via* le nettoyage des DVA n'est pas envisageable. Aujourd'hui, ces tâches sont essentiellement réalisées par des entreprises sous-traitantes (LAFP 2023) ou bien la rotation des personnels de nettoyage de ces établissements est trop importante.

De plus, l'étude du risque de cancer, particulièrement de mésothéliome nécessite de rassembler un nombre important de travailleurs exposés aux FCA.

- Réalisation d'études à partir des données du PNSM

Deux études aux résultats contradictoires ont été conduites à partir des données du PNSM concernant les ASH (LAFP 2023) :

- La première avait pour objectif de calculer l'incidence des mésothéliomes chez des ASH et de comparer avec ce qui est attendu en population générale. Cette étude suggère que l'incidence de mésothéliome chez les ASH est supérieure à ce qui est attendu en population générale (cf. chapitre 4.2.3).
- La deuxième étude avait pour objectif de comparer la proportion d'ASH parmi les cas de mésothéliomes à la proportion d'emplois d'ASH dans la population française, et de réaliser cette comparaison pour de 3 autres catégories professionnelles : aides-soignant(e)s et infirmier(e)s diplômé(e)s d'Etat (AS/IDE) (même environnement mais n'interviennent pas sur les sols), banquiers (contrôles non exposés), tuyauteurs

(contrôles exposés). Cette étude a montré une surreprésentation des tuyauteurs chez les sujets atteints de mésothéliome par rapport à la population française mais il n'a pas été observé de différences significatives pour les trois autres groupes professionnels. Ces conclusions doivent être relativisées compte tenu des faibles effectifs de mésothéliomes observées dans la base du PNSM sur ces 4 catégories (ASH = 30, AS/IDE = 46, banquiers = 49 tuyauteurs = 170)

#### 4.4.2 Discussion autour de la pertinence et de la faisabilité de réaliser des études *in vitro* ou *in vivo*

Après discussion sur la pertinence et la faisabilité de réaliser une étude *in vitro* ou une étude *in vivo* chez l'animal, il ne paraît pas pertinent de proposer des études d'exposition chronique *in vivo* étant donné les nombreuses publications analysées qui ont déjà observé un effet biologique des FCA. Ces constatations sont supportées par les connaissances sur le mécanisme d'action des fibres d'amiantes (internalisation par les cellules, biopersistance, caractéristiques physico-chimiques en relation avec un effet biologique).

La réalisation d'études *in vitro* (cytotoxicité, génotoxicité) nécessite en premier lieu d'étudier la faisabilité de collecter des FCA émises par exemple lors du nettoyage des DVA à la monobrosse, voire de préparer des échantillons de FCA à partir d'amiantes naturels (environnemental). Ces expérimentations *in vitro* apporteraient des éléments partiels intéressants et utiles sur le danger des FCA. Néanmoins, ces approches expérimentales peuvent présenter des limites liées à d'éventuelles contaminations, à la modification de la réactivité de surface, etc.

En l'état actuel, aucun protocole précis ne peut être proposé par le GT.

## 4.5 Conclusion

Très peu de nouvelles études sur les effets sanitaires des FCA ont été identifiées dans la littérature depuis le précédent rapport (Anses 2022).

Aucune nouvelle étude épidémiologique n'a été identifiée. Comme souligné en 2022, la difficulté d'interprétation des résultats de ces études réside dans le fait qu'il n'est pas possible d'établir si les effets sanitaires observés chez les travailleurs sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre des fibres courtes. Pour pallier cette limite, il faudrait que les résultats des études épidémiologiques soient exprimés en fonction de la composition de l'aérosol pour pouvoir comparer les risques en fonction de la granulométrie des fibres.

Une autre solution serait de disposer d'études sur des travailleurs exposés exclusivement (ou quasi exclusivement) aux FCA. A ce jour, les travailleurs exposés *via* le nettoyage des dalles de sol en vinyle amianté (DVA) par des mono-brosses constituent une des rares populations de travailleurs identifiées comme étant quasi-exclusivement exposées aux FCA. Parmi ces travailleurs, les ASH sont particulièrement intéressants à étudier car les DVA constituent habituellement leur seule source d'exposition professionnelle potentielle à l'amiantes. Cependant, les données sanitaires disponibles sur les ASH acquises à partir des données du PNSM ne permettent pas de conclure sur le danger des FCA. La conduite d'une étude de cohorte prospective sur une population d'ASH ne permettra pas de répondre à la question. Cela est lié aux difficultés de suivi et au fait que le recours de plus en plus fréquent à la sous-

traitance à des entreprises extérieures pour la réalisation de ces tâches limite la probabilité d'exposition "quasi-exclusive" aux FCA. Il serait intéressant de pouvoir identifier d'autres catégories professionnelles exposées quasi-exclusivement aux FCA pour la réalisation d'une nouvelle étude à partir des données du PNSM, ou d'une étude de cohorte ou cas-témoins sur le mésothéliome ou sur le cancer du poumon. Pour la réalisation d'une étude de cohorte rétrospective ou d'une étude cas témoins, la difficulté principale est d'identifier rétrospectivement des expositions professionnelles quasi exclusives aux FCA.

**En conclusion, il est primordial de documenter par la métrologie les situations d'exposition exclusive ou quasi-exclusive des travailleurs aux FCA avant de se poser la question d'un point de vue épidémiologique.**

Deux nouvelles études *in vitro* ont été identifiées dans la littérature. Ces études confirment que les FCA ont des effets biologiques, et que leurs effets *in vivo* ne devraient pas être sous-estimés. La conduite de nouvelles études *in vitro* peut apporter des éléments partiels sur le danger des FCA. Cependant, cela nécessite d'étudier la faisabilité de constituer des échantillons quasi exclusivement constitués de FCA et non ou peu modifiés par la préparation.

Dans le domaine expérimental, outre les données sur les effets comparatifs entre FCA et fibres longues d'amiante, il existe des données obtenues avec des particules nanométriques allongées manufacturées (essentiellement nanotubes de carbone, nanofils d'argent, nanofils de Nickel) permettant de comparer les effets de fibres synthétiques courtes versus des fibres longues ayant une même composition chimique (Poland *et al.* 2012 ; Nel 2023 ; Schinwald *et al.* 2012a ; Schinwald *et al.* 2012b ; Schinwald *et al.* 2012 c ; Wang *et al.* 2019 ; Chung *et al.* 2017 ; Silva *et al.* 2014). Les résultats ont confirmé le rôle différentiel de la longueur et ont montré que, comme pour les FCA, des fibres synthétiques courtes induisent des effets biologiques *in vivo* et *in vitro*. A noter qu'il n'existe pas d'étude *in vivo* à long terme de type cancérogénèse avec ces fibres synthétiques courtes. Enfin, pour rappel, certaines particules isométriques, comme la silice cristalline, sont capables d'induire des pathologies avérées chez l'humain.

Cependant, il est important de noter que même si ces données peuvent fournir des indications utiles, il existe des différences spécifiques entre ces nanoparticules et les fibres d'amiante, et les résultats ne peuvent pas être directement extrapolés. En effet, le groupe de travail rappelle que les caractéristiques dimensionnelles ne sont pas les seuls paramètres responsables de la toxicité de l'amiante. D'autres paramètres, comme la réactivité de surface ou la composition chimique, conditionnent l'interaction avec les cellules et/ou la réponse cellulaire et contribuent aux effets observés.

**Au final, les conclusions de 2022 restent inchangées : malgré des difficultés d'interprétation, les données chez l'humain vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA. Les quelques nouvelles données expérimentales et *in silico* confirment que les FCA ont des effets biologiques propres.**

## 5 Présence de FCA dans les matériaux et émissivité

### 5.1 Rappel des conclusions de l'Anses de 2022 et méthode de travail

#### 5.1.1 Rappel des conclusions de l'Anses de 2022

L'expertise de 2022 a actualisé les données métrologiques et d'exposition aux FCA et PMAi courtes. Les conclusions des expertises de 2009 et 2015 ont été rappelées et une synthèse des données de mesure de FCA réalisée. De plus, une recherche bibliographique a été effectuée, ce qui a permis l'identification et la synthèse de 15 études portant sur les distributions en tailles de fibres ou la mesure de concentration en fibres d'amiante ou de PMA dans l'air de différents secteurs industriels ou lieux de vie, dans l'environnement général ou en lien avec des appareils de protection respiratoire.

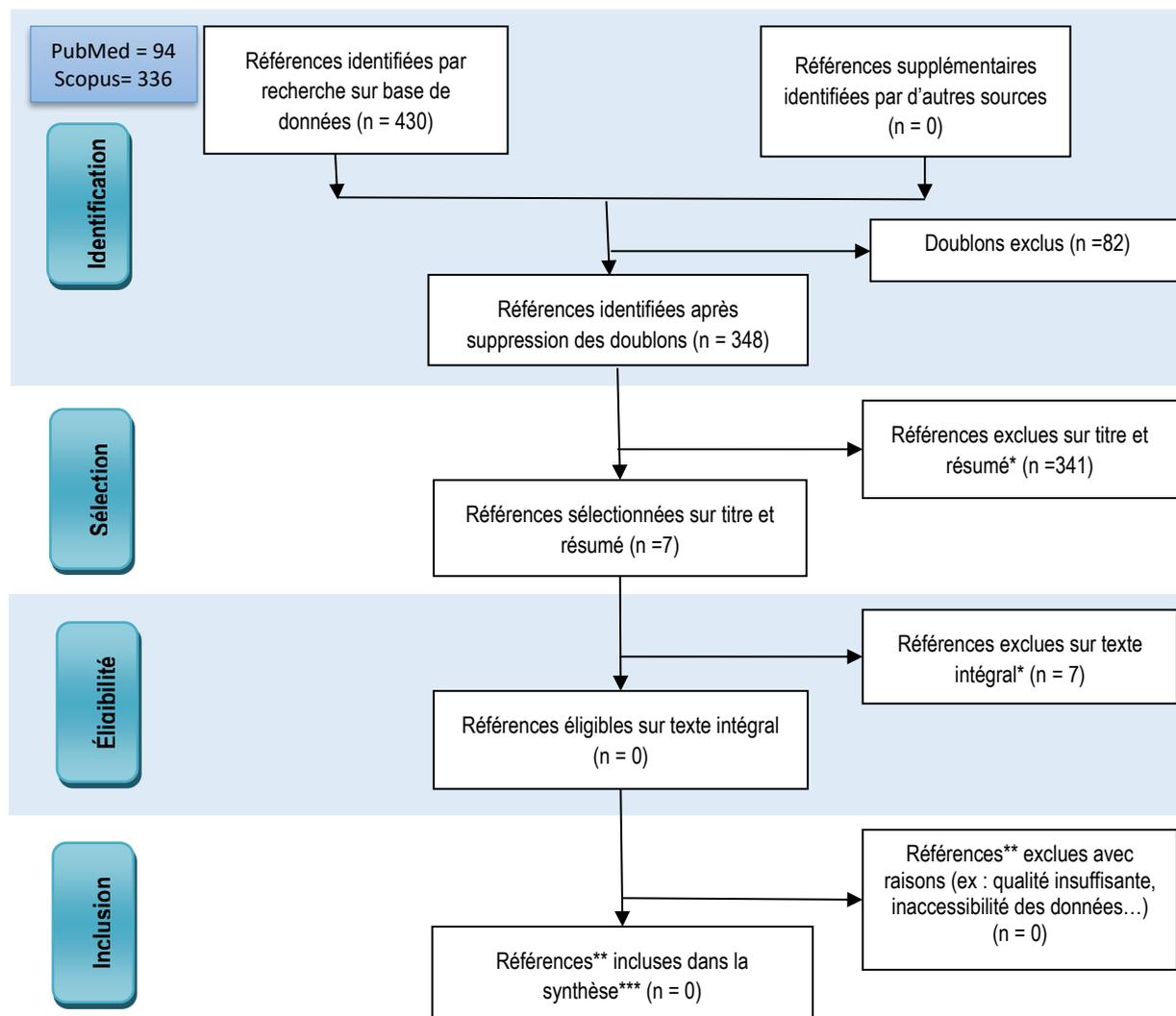
Suite à l'analyse des données, le rapport concluait de la sorte sur :

- La présence prépondérante des FCA/PMAi courtes, quelles que soient les activités professionnelles investiguées ;
- La co-présence généralement des fibres courtes et longues ;
- L'existence d'amas mis en évidence dans certains cas (DVA) mais peu documentés et généralement non précisés dans les rapports d'essais ;
- Le fait que les FCA/PMAi courtes sont généralement non mesurées/analysées en l'absence de réglementation spécifique.

#### 5.1.2 Méthode de travail

La Figure 2 synthétise la démarche de sélection des nouvelles études dans le domaine de l'expologie et de la métrologie.

Sept études ont été identifiées *via* les bases de données Scopus et Pubmed. Ces 7 études n'apportaient pas d'éléments pertinents sur l'émissivité des matériaux en FCA ou sur l'exposition professionnelle aux FCA.



\* si utile, préciser les raisons d'exclusions ou encore le nombre de références exclues par raison d'exclusion

\*\* si pertinent selon les besoins de la méthode d'expertise, rapporter le nombre d'études à la place du nombre de références

\*\*\* expliciter s'il s'agit d'une synthèse qualitative ou quantitative ou éventuellement deux synthèses séparées.

## Figure 2 : Sélection des études d'intérêt relatives à la présence et à l'émissivité des FCA depuis les matériaux

L'Annexe 9 liste l'ensemble des références éligibles sur texte intégral et le motif d'exclusion, le cas échéant.

En complément de cette recherche bibliographique 4 études ou rapports d'intérêt ont été identifiés par le groupe de travail (Québec 1973, brevet de 1979, BRGM 1997, LAFP 2023).

A noter qu'il n'existe pas de données d'émissivité obtenues en conditions expérimentales. Il existe par contre des données de concentrations en fibres retrouvées dans l'air, lors de mesures sur opérateurs ou d'ambiance en environnement professionnel, avec potentiellement l'application de moyens de protection. Ces données de concentrations permettent indirectement d'approcher la notion d'émissivité.

## 5.2 Présence de FCA et émissivité depuis les matériaux naturels

### 5.2.1 Présence de FCA dans les matériaux naturels

#### 5.2.1.1 Occurrences de FCA dans l'environnement

Les structures fibreuses d'amiante observées dans l'environnement naturel correspondent très souvent à des faisceaux de fibres de longueur très supérieure à 5 µm et ce, quel que soit le type d'amiante considéré (serpentine ou amphibole) (cf. Figure 3 et Figure 4). Ainsi, il n'est pas rare d'observer des structures fibreuses d'amiante dans lesquelles les fibres ont une longueur millimétrique à pluricentimétrique, voire pluridécimétrique. Il n'existe pas de raison de penser que de telles structures, aisément identifiables d'un point de vue macroscopique, ne puissent pas être associées à des structures constituées de FCA ou contenant elles-mêmes des FCA. L'observation de structures fibreuses macroscopiques ( $L > 0,5$  mm) doit donc conduire à suspecter la présence de FCA dans le matériau considéré.

Dans l'environnement naturel, de nombreux types de roche contiennent ou sont susceptibles de contenir des structures fibreuses d'amiante (Lahondère *et al.* 2021). L'amiante chrysotile étant associé à une gamme très restreinte de roches (péridotites serpentinisées, serpentinites), la problématique des FCA de chrysotile peut être considérée comme circonscrite à ces seules roches.

En revanche, les amphiboles étant présentes dans de nombreuses roches, les occurrences à amphiboles fibreuses sont beaucoup plus variées et plus difficiles à qualifier du point de vue de leurs caractéristiques morphologiques et dimensionnelles (occurrences fibreuses non asbestiformes, asbestiformes ou composites). La problématique associée à la présence ou non de FCA sera donc beaucoup plus difficile à cerner.

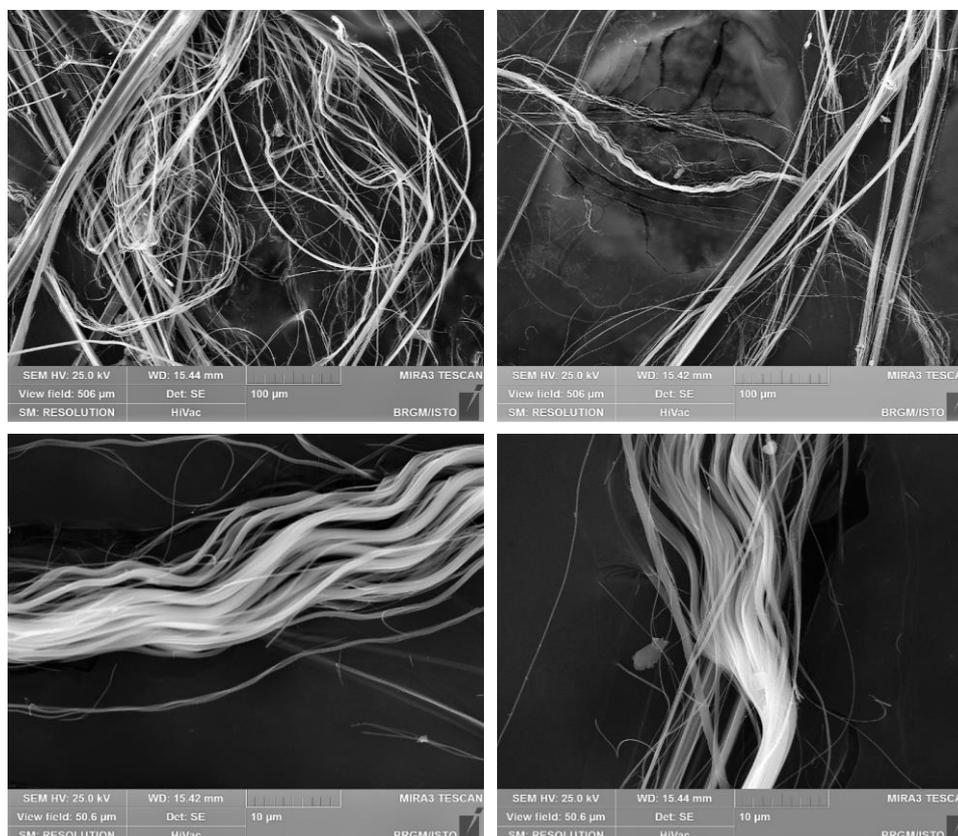


Figure 3 : Faisceaux de fibres de chrysotile (Haute-Corse) (source : BRGM)

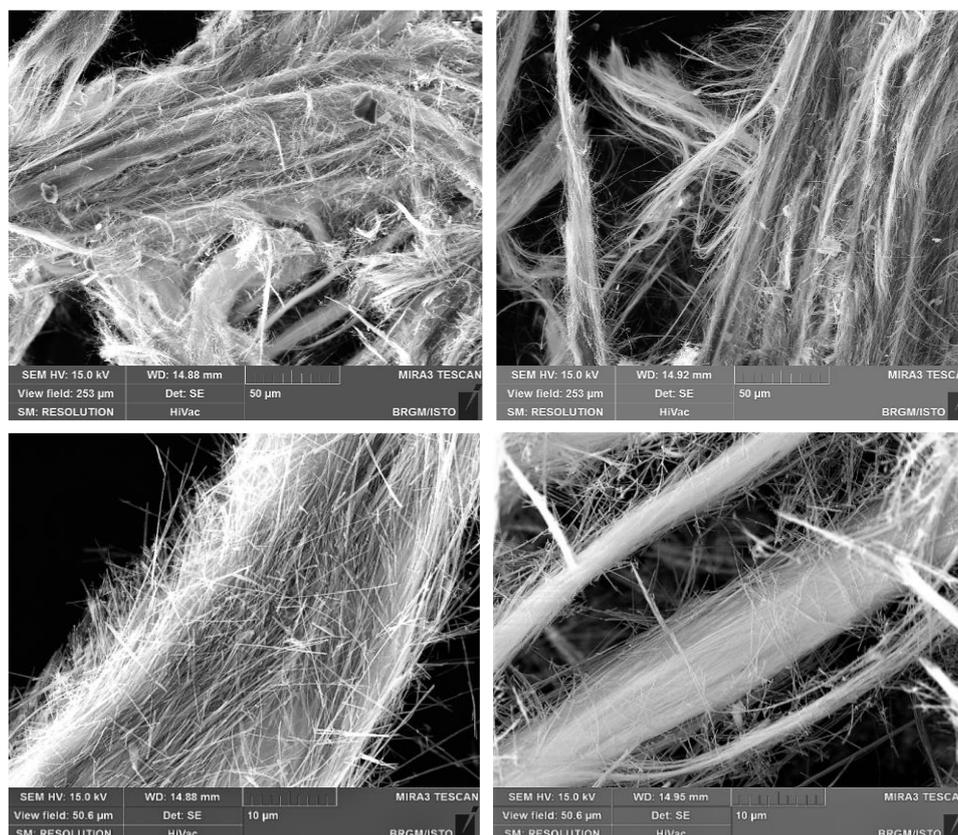


Figure 4 : Faisceaux d'actinolite-amiante (Métabasaltes, Haute-Corse) (source : BRGM)

### 5.2.1.2 Résultat d'analyse de FCA dans les matériaux naturels

Aucune étude présentant des résultats d'analyse de FCA dans les matériaux naturels n'a été identifiée.

A noter que pour l'analyse en META de matériaux susceptibles de contenir de l'amiante, doivent être prises en compte les fibres dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3 et la longueur est supérieure à 0,5 µm, mais le décompte spécifique des FCA n'est pas exigé (Arrêté du 1er octobre 2019 relatif aux modalités de réalisation des analyses de matériaux et produits susceptibles de contenir de l'amiante, aux conditions de compétences du personnel et d'accréditation des organismes procédant à ces analyses).

## 5.2.2 Emissivité en FCA depuis les matériaux naturels

### 5.2.2.1 Considérations préalables

Les faisceaux multifibreux correspondant aux structures fibreuses d'amiante ont naturellement la capacité de se dissocier en fibres secondaires. Lorsqu'elle intervient, cette dissociation se traduit par l'individualisation de fibrilles de plus en plus fines avec des rapports d'allongement de plus en plus élevés. Un tel processus de dissociation intervient dès lors que les structures fibreuses d'amiante sont mises en contact avec l'atmosphère et/ou libérées de leur matrice rocheuse (par action anthropique ou naturelle). Du fait des caractéristiques dimensionnelles des structures fibreuses d'amiante macroscopiques et des caractéristiques propres aux fibrilles d'amiante qui les constituent, notamment leur capacité à se courber ou à se plier sur

elles-mêmes, ces fibrilles sont peu susceptibles de correspondre à des FCA, du moins pour l'essentiel d'entre-elles.

Néanmoins, il est important de souligner que les occurrences amiantifères observées dans les matériaux naturels sont souvent composites et incorporent, à côté des structures et des fibrilles d'amiante *sensu stricto*, des particules fibreuses de même nature minéralogique, plus ou moins fines mais non asbestiformes. Ces particules fibreuses non asbestiformes, rectilignes et à morphologie aciculaire à prismatique, sont susceptibles de se fragmenter en particules secondaires, certaines d'entre-elles pouvant répondre aux critères dimensionnels des FCA. Cette capacité à se fragmenter dépendra notamment de la nature et de l'intensité des contraintes mécaniques appliquées au matériau. Cette capacité existera également pour tous les matériaux non amiantifères contenant des cristaux tridimensionnels d'actinolite, de trémolite, d'anthophyllite, de cummingtonite, de grunérite ou de riébeckite. Ce dernier point souligne à lui seul toutes les difficultés auxquelles un analyste peut être confronté dans le cadre d'une recherche d'amiante dans un matériau naturel, les critères dimensionnels retenus pour les FCA ( $L < 5 \mu\text{m}$ ,  $D < 3 \mu\text{m}$ ,  $L/D > 3$ ) ne permettant pas toujours de garantir la nature asbestiforme des particules considérées.

En fonction des événements tectoniques et métamorphiques qu'ils ont subis au cours de leur histoire géologique, souvent complexe et polyphasée, les matériaux naturels sont plus ou moins concernés par la présence éventuelle d'occurrences fibreuses, asbestiformes ou non. La capacité d'un matériau à libérer des FCA ou des PMAi courtes est ainsi directement liée à l'abondance, à la typologie et à la morphologie des minéraux d'intérêt qu'il renferme. Celle-ci dépend également du degré d'altération du matériau et des contraintes mécaniques appliquées au matériaux.

#### 5.2.2.2 Données d'émissivité disponibles

Il n'a pas été identifié de données d'émissivité en FCA depuis les matériaux naturels dans la littérature. La Convention de Recherche et Développement (CRD) menée entre l'Anses, le BRGM, l'INRS et le LAFP avait pour objectif de déterminer la capacité des roches contenant des amphiboles non asbestiformes à générer des PMA de type OMS, dès lors que ces roches étaient soumises à des contraintes mécaniques se traduisant par l'émission de poussières fines (Anses BRGM-INRS LAFP (2018)). Cette étude a montré que dans les conditions de l'essai, toutes les roches émettent des PMA d'amphiboles (PMA). Ces PMA sont, pour la plupart, des PMA courtes (longueur  $< 5 \mu\text{m}$ ), probablement en lien avec le mode de génération. Néanmoins, la plupart des roches émettent des PMA de dimensions OMS dans des proportions variables, pouvant aller jusqu'à 33 %. Ces matériaux ayant été soumis à une sollicitation mécanique particulière, l'interprétation des résultats de cette étude est ainsi limitée à ces conditions expérimentales. Ils ne sont pas directement comparables à ce qu'il est possible de retrouver en conditions réelles d'attrition de granulats naturels, dans l'atmosphère de carrières ou de chantiers de BTP par exemple, que ce soit en termes de granulométrie et de morphologie des PMA émises.

La campagne CARTO PMAi en cours coordonnée par l'OPPBTB (Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics) apportera des données d'émissivité en PMAi courtes pour quelques situations en carrières, dans le bâtiment et les travaux publics, pour différents couples matériaux/techniques.

## 5.3 Présence de FCA et d'amas de fibres, émissivité depuis les matériaux manufacturés

### 5.3.1 Présence de FCA dans les matériaux manufacturés

#### 5.3.1.1 Utilisations commerciales potentielles de l'amiante en fonction de la qualité des fibres et de leur longueur

L'expertise Anses de 2009 décrivait les différents systèmes de tri en longueur des fibres d'amiante, notamment les méthodes de tri à sec et à l'humide pour qualifier la qualité de l'amiante. La première méthode correspond au test normalisé standard du Québec (QS) qui effectue un tamisage à sec permettant de classer les fibres de chrysotile en fractions de taille décroissante. La qualité commerciale d'une fibre de chrysotile est directement proportionnelle à la quantité retenue sur le premier tamis et inversement proportionnelle à la quantité recueillie dans le bac de réception. La seconde méthode utilise un liquide et différentes grilles d'ouverture décroissante pour trier les fibres. Toutefois, ce classement intitulé Bauer-McNett n'était pas reconnu unanimement (Anses 2009).

S'appuyant sur deux références (Barbeau *et al.*, 1979 et Rice et Heineman, 2003), différents secteurs, produits et utilisations avaient été mis en évidence comme employant des fibres plus courtes. L'expertise concluait que les fibres les plus courtes de chrysotile étaient utilisées principalement pour la production de produits de friction (freins, matériels de friction industriels, réparation, fabrication), de peinture, enduits et mastics, ou encore de feutres de toiture. En revanche, les fibres d'amosite ont été utilisées dans la plupart des secteurs, qu'elles soient longues ou courtes (Anses 2009).

La consultation des documents historiques a confirmé les conclusions de l'expertise de 2009 à propos des différentes classifications des fibres en fonction des pays lors de l'extraction et la production d'amiante. En plus du critère de longueur, d'autres aspects macroscopiques pouvaient être considérés pour classer les fibres, comme par exemple la texture. A partir des années 1970, la classification du QAMA (Quebec Asbestos Mining Association) au Canada s'est progressivement imposée comme le standard international (Québec 1973). Cette classification était employée pour l'amiante chrysotile exclusivement et permettait de grossièrement trier l'amiante en 9 groupes. Ces 9 groupes de taille décroissante sont décrites en détail dans les différents documents techniques (Québec 1973). Les groupes 6 à 9 contenaient préférentiellement des fibres de longueurs plus courtes et étaient utilisées pour différentes applications (une partie des fibres des groupes 6 et 7 ont une longueur comprise entre 4,75 mm (0,187 pouces) et 1,35 mm (0,053) et une partie ont une longueur inférieure à 1,35 mm. Les fibres des groupes 8 et 9 ont une longueur inférieure à 1,35 mm).

De la même manière, le *memento* élaboré par le BRGM en 1997 décrit différents produits et utilisations en fonction des groupes d'amiante. Il reprend la classification QAMA et indique que les fibres du groupe 7 étaient utilisées dans de nombreuses applications comme charge, et dans le ciment et les groupes 8 et 9 (sable-gravier) pour l'asphalte (BRGM 1997).

Le Tableau 4 liste sommairement les produits et utilisations pour lesquels des fibres plus courtes étaient incorporées, en particulier le groupe 7. Pour les groupes 8 et 9 (Sable-gravier), seule une utilisation dans le ciment et l'asphalte est rapportée.

**Tableau 4 : Produits manufacturés contenant des fibres de chrysotile de qualité inférieure (groupe 6 à 9)**

groupe 6	groupe 7	groupe 8 & 9	référence
Produit de ciment amianté, papiers, bande de freins, revêtements, mastics, plastiques	revêtements, mastics, peintures, tiges à souder, tuiles de plancher, plâtre acoustique, graisses, boues de puits d'huiles, charges minérales.	Sable-gravier	Classification québécoise QAMA (1973)
Mélange de produits en ciment d'amiante, joints, garnitures de freins, feuilles de vinyle et cartons amiantés	garnitures de freins moulées et garnitures d'embrayage, charge dans les carreaux de sol en vinyle et en asphalte, dans les composés d'asphalte, ciments pour joints et isolation, revêtements de toiture, plastiques et composés de calfeutrage.	-	Brevet sur les méthodes d'exploitation de l'amiante (1979)
-	charge minérale fibreuse dans des produits tels que composés asphaltés et bétons bitumineux, garnitures de freins (moulées), revêtement de sol, matériels de friction en général, produits moulés à chaud et à froid, charges dans les peintures, papiers et plastiques, composés thermoplastiques, tuiles.	-	Barbeau et al. (1979) - issu de Anses 2009
-	charge, ciment...	asphalte	BRGM 1997
-	production de produits de friction (freins, matériel de friction industriels, réparation, fabrication), de peinture, enduits et mastics, ou encore de feutres de toiture.	-	Anses 2009

**Il faut noter que les termes historiques « longues » et « courtes » utilisés dans la production de produits ou matériaux amiantés, correspondent à des ordres de grandeur à l'échelle macroscopique (quelques millimètres), et sont donc différents de ceux utilisés au moment des analyses microscopiques, associés au seuil réglementaire de 5 µm. Pour autant, cela confirme l'utilisation préférentielle de fibres plus courtes d'amiante dans certains produits dès leur conception.**

#### 5.3.1.2 Résultats d'analyse de FCA dans les matériaux manufacturés

Aucune étude présentant des résultats d'analyse de FCA dans les matériaux manufacturés n'a été identifiée.

A noter pour l'analyse en META de matériaux susceptibles de contenir de l'amiante, doivent être prises en compte les fibres dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3 et la longueur est supérieure à 0,5 µm, mais le décompte spécifique des FCA n'est pas exigé (Arrêté du 1er octobre 2019 relatif aux modalités de réalisation des analyses de matériaux et produits susceptibles de contenir de l'amiante, aux conditions de compétences du personnel et d'accréditation des organismes procédant à ces analyses).

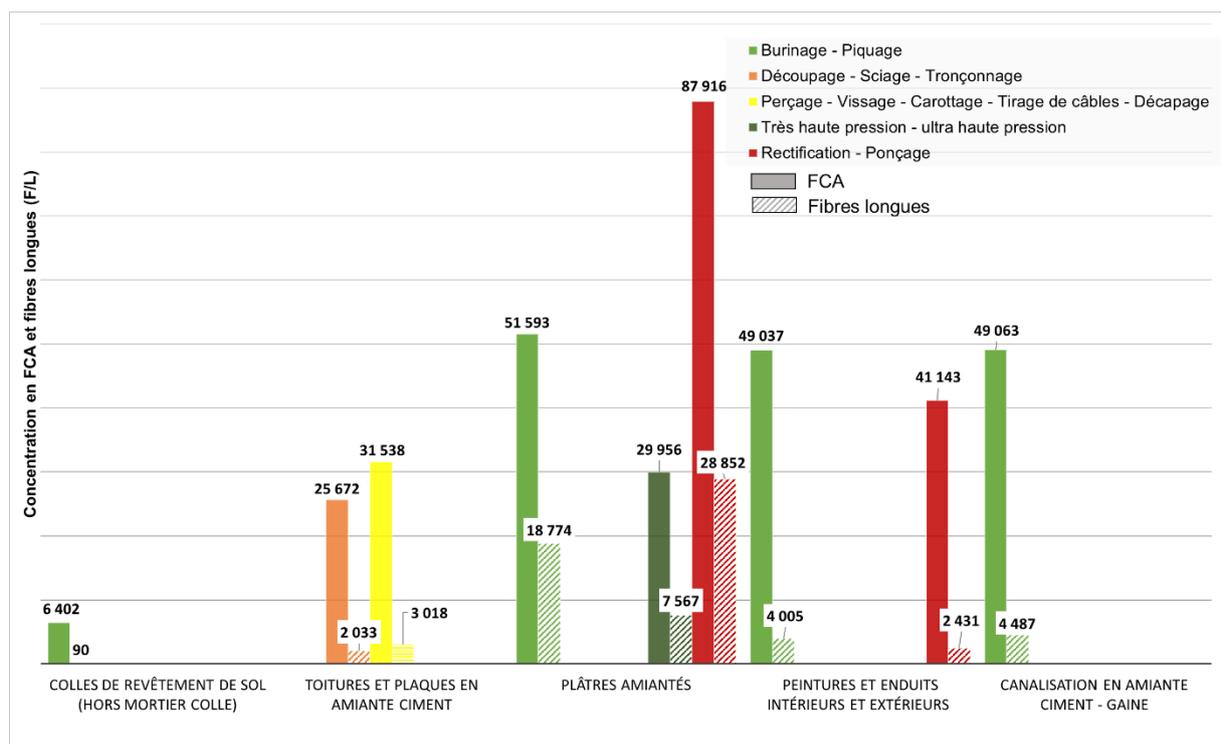
#### 5.3.2 Émissivité en FCA depuis les matériaux manufacturés

L'expertise Anses de 2022 présentait les résultats de différentes études documentant les concentrations en FCA mesurées dans l'air, notamment la campagne META DGT de 2011,

ainsi que l'étude INRS de 2022 relative aux facteurs de protections assignés. Les principaux résultats de ces études sont rappelés ci-après, et ont été complétés par les résultats d'une étude menée par le LAFP relative aux données d'exposition professionnelles et environnementales aux fibres d'amiante, longues et courtes, lors de processus courants d'entretien de DVA avec des monobrosses équipées de disques abrasifs (nettoyage, lustrage, décapage).

### Campagne META DGT de 2011 (INRS 2011)

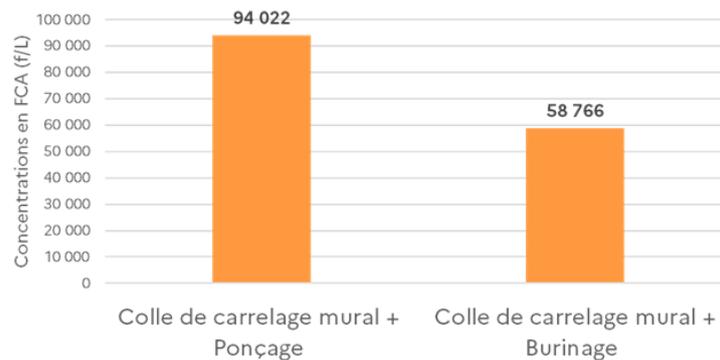
La campagne META organisée par la DGT entre novembre 2009 et octobre 2010 avait pour objectif de caractériser par META l'exposition aux fibres d'amiante en distinguant les longues (fibres « OMS »), les courtes (FCA) et les fines (FFA) lors de travaux sur matériaux amiantés. Sur le total de 265 mesures effectuées pendant des opérations de retrait correspondant à 29 types de chantier, des FCA ont été mesurées dans toutes les situations (moyenne de 7 FCA/L à 75980 FCA/L) avec des concentrations élevées de FCA retrouvées dans certains cas (INRS 2011). La Figure 5 présente les médianes supérieures ou égales à 6 000 FCA/L pour différents couples matériau / technique de retrait ou de traitement (d'après INRS 2011). Cette valeur de 6 000 FCA/L a été sélectionnée par analogie au seuil réglementaire du 3<sup>ème</sup> niveau d'empoussièrement en fibres longues d'amiante.



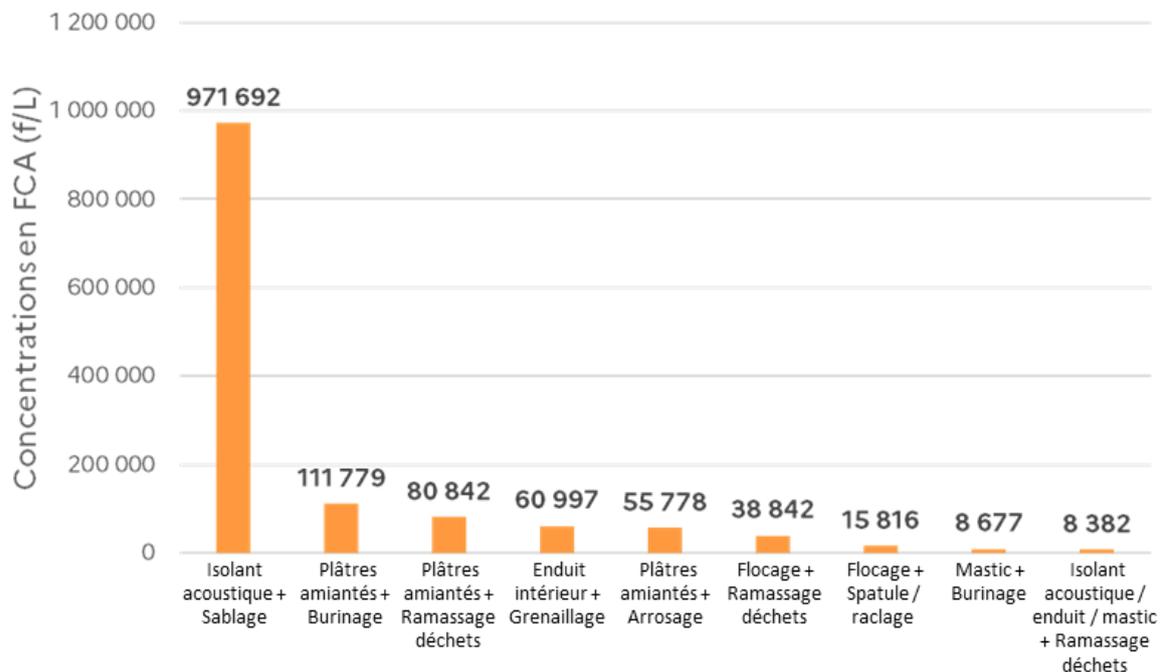
**Figure 5 : résultats de la campagne META de 2011 - concentrations médianes supérieures ou égales à 6 000 FCA/L en fonction des couples matériau traité et technique de retrait ou de traitement et concentrations en fibres longues correspondantes (d'après INRS 2011)**

### Campagne INRS de 2022 (INRS 2022)

Dans le cadre d'une campagne INRS conduite en 2014 et 2015 pour la détermination des FPA des appareils de protection respiratoire (APR) utilisés en chantier de désamiantage, des mesures individuelles de FCA et à l'intérieur de masques de protection ont été réalisées pour des chantiers de niveau d'empoussièremment 2 et 3. Le comptage des fibres d'amiante a été effectué par META selon les classes granulométriques suivantes : fibres longues (« OMS »), courtes (FCA) et fines (FFA). Il est précisé que, dans le cas de niveaux d'empoussièremment importants, le nombre de FCA ne peut être déterminé avec précision et donc l'analyse doit être considérée comme semi-quantitative. Dans la Figure 6 et la Figure 7, les concentrations moyennes en FCA correspondant aux mesures individuelles sont reprises, respectivement pour les chantiers de niveaux 2 et 3. Ces concentrations moyennes sont classées par ordre décroissant en reprenant la même valeur seuil de 6 000 FCA/L, par analogie au seuil réglementaire du 3<sup>ème</sup> niveau d'empoussièremment en fibres longues.



**Figure 6 : résultats de la campagne INRS 2022 - concentrations moyennes  $\geq$  6 000 FCA/L pour les chantiers de niveau 2 (mesures individuelles)**



**Figure 7 : résultats de la campagne INRS 2022 - concentrations moyennes  $\geq$  6 000 FCA/L pour les chantiers de niveau 3 (mesures individuelles)**

Ainsi, au vu de ces campagnes de mesures, des concentrations élevées en FCA dans l'air des lieux de travail sont bien retrouvées, en particulier :

- Lors d'interventions sur certains matériaux : isolants acoustiques, plâtres amiantés, peintures et enduits intérieurs et extérieurs, colles de carrelage mural, flocages, canalisations / toitures / plaques en amiante ciment, mastics, DVA.
- Avec certaines techniques de retrait ou traitement : sablage, burinage / piquage, ramassage de déchets, rectification / ponçage, grenailage, arrosage, perçage / vissage / carottage / tirage de câbles / décapage, THP-UHP (Très haute pression-ultra haute pression), spatule / raclage, décapage à sec des DVA.

Pour autant, ces campagnes étaient exploratoires et ne sont donc pas représentatives de l'ensemble des situations d'exposition aux FCA en milieu professionnel. De plus, la mesure des FCA n'était pas l'objectif principal de ces études et donc des difficultés lors des analyses ont pu être rencontrées (saturation des filtres, durées de prélèvement non adaptées, etc.).

### Etude Davinylair (LAFP 2023)

Plus récemment, l'étude réalisée entre 2017 et 2022 par le Laboratoire amiante, fibres et particules (LAFP) du service des laboratoires de santé environnementale de la ville de Paris (SPSE) avait pour objectif l'acquisition de données d'exposition professionnelles et environnementales aux fibres d'amiante, longues et courtes, lors de processus courants d'entretien de DVA avec des monobrosses équipées de disques abrasifs (nettoyage, lustrage, décapage). Différents prélèvements ont été effectués, sur opérateurs et dans l'air ambiant des locaux où ces opérations d'entretien étaient menées.

La norme NF X43-269 a été suivie pour les prélèvements individuels sur deux opérateurs en appliquant un débit de 3 L/min pendant la durée de l'opération (1h/1h30). Pour les mesures dans l'air ambiant, l'étude a respecté les consignes de la norme NF X43-050. Des prélèvements dans l'air ambiant étaient réalisés avec un dispositif de prélèvement CATHIA et un débit de prélèvement de 7 L/min avant, pendant et après l'opération (2 points de prélèvement sur une durée de 4h). Cette stratégie respectait les recommandations du guide d'application GA X 46-033.

Des éléments complémentaires sur la méthode d'analyse par microscopie seront apportés en partie 6.2. Les résultats de cette étude, synthétisés dans le Tableau 5, ont permis d'apporter des données d'exposition professionnelles et environnementales aux fibres d'amiante lors de processus courants d'entretien de DVA. Au total, 65 analyses de filtres par META ont été réalisées, 18 filtres sur opérateurs et 47 filtres d'air ambiant. Une recherche de corrélation entre fibres longues et courtes a également été conduite et les résultats ont montré qu'aucune corrélation n'existe entre ces deux populations de fibres.

Le rapport précise que les fibres mesurées dépassent rarement 1 µm de longueur et ont des diamètres de l'ordre de 0,1 / 0,2 µm.

Les résultats dépendent du mode opératoire et des opérateurs. Des niveaux élevés en FCA sont obtenus, le décapage à sec (pratique en principe proscrite) étant la technique la plus émissive avec des maximas à plus de 10 000 FCA/L (et 41 fibres longues/L) et une moyenne de plus de 3600 FCA/L (Cf. Tableau 5). L'autolaveuse constitue une exception car cette technique n'émet pas ou très peu de fibres (courtes ou longues).

- Les FCA sont fréquemment agglomérées en amas, et ces amas ont été identifiés sur la plupart des échantillons. Le rapport précise qu'ils comprennent plusieurs dizaines voire centaines de FCA, ce qui rend impossible un dénombrement individuel exact et conduit à une évaluation imprécise. Par conséquent, les FCA sont susceptibles d'être sous-estimées.

**Tableau 5 : Résultats de Davinylair 2022 – concentrations moyennes en FCA et en fibres longues en fonction des techniques de nettoyage des DVA**

		Auto-laveuse		spray method		lustrage		Décapage au mouillé		décapage à sec	
		FCA (F/L)	FL (F/L)	FCA (F/L)	FL (F/L)	FCA (F/L)	FL (F/L)	FCA (F/L)	FL (F/L)	FCA (F/L)	FL (F/L)
opérateur	min	< 3	< 3	19	< 4,7	65	< 3,0	10	< 3,0	380	< 5,5
	max	4	< 4,7	290	< 4,7	1240	< 4,7	1678	7,9	10249	41
	moyenne	< 4,5	< 3,4	162	< 4,7	473	< 3,6	789	< 4,7	3622	17
	ecart type	2,1	0,7	111	0	543	0,8	778	2,0	3597	13
	N	5	5	3	3	3	3	4	4	5	5
ambiance	min	< 2	< 1	14	< 1,4	6	< 1,4	104	< 1,0	206	< 2,2
	max	< 3	< 1,5	268	4,3	562	< 2,3	434	5,2	2180	3,9
	moyenne	< 2,3	< 1,3	89	< 2,5	257	< 1,7	268	< 3,0	775	< 2,9
	ecart type	0,4	0,3	105	1,2	242	0,4	144	1,5	729	0,7
	N	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5

*Pour le calcul des moyennes les valeurs < LQ ont été considérées comme égales à la LQ*

**Cette nouvelle étude confirme des niveaux d'exposition élevés aux FCA pour les opérateurs lors de certains processus d'entretien de DVA avec des mono-brosses équipées de disques abrasifs, et confirme également que ces opérations sont très peu émissives en fibres longues, avec des situations pour lesquelles les opérateurs étaient exposés exclusivement à des FCA. Cette nouvelle étude confirme également la présence d'amas impactant le décompte de FCA mais n'apporte pas d'éléments complémentaires quant à l'origine de leur formation.**

### 5.3.3 Identification de situations fréquentes d'exposition professionnelles à l'amiante

Pour pallier le manque de données d'émissivité en FCA depuis les matériaux manufacturés et de données d'exposition aux FCA, il pourrait être intéressant de mesurer les FCA dans l'air :

- au cours des processus les plus fréquemment mis en œuvre dans les environnements professionnels. En effet ces processus étant les plus fréquemment mis en œuvre, l'exposition des travailleurs aux FCA est potentiellement également plus fréquente lors de ces processus.
- au cours de processus avec de faibles niveaux de concentrations en fibres longues afin d'identifier des situations pour lesquelles les mesures de protection pourraient être insuffisantes. En effet les niveaux en FCA n'étant pas corrélés aux fibres longues, il peut exister des situations pour lesquelles les niveaux de fibres longues sont inférieurs à la VLEP, et donc ne conduisent pas à la mise en place de mesure de protection spécifique, mais pour lesquelles les concentrations en FCA dans l'air sont élevées. Cette situation est par exemple rencontrée lors de l'entretien courant de DVA avec des techniques abrasives et à sec (pratique en principe proscrite).

La base de données Scola, gérée par l'INRS à la demande de la DGT, permet de collecter les mesures d'empoussièrement effectuées dans le cadre des contrôles réglementaires d'exposition aux fibres d'amiante, et permet ainsi d'identifier les situations ayant fait l'objet d'un plus grand nombre de mesures, et donc indirectement d'identifier les situations les plus fréquentes. L'INRS a publié le rapport d'activité pour la période du 1<sup>er</sup> juillet 2012 au 31 décembre 2022 et rend compte du nombre de mesures par matériau et par technique. Sur cette période, 398 212 mesures ont été enregistrées, dont près de 50,5 % pour lesquelles aucune fibre d'amiante n'a été détectée.

L'Annexe 10 et l'Annexe 11 rapportent le nombre de mesures respectivement par matériau et par technique pour les sous-section 3 (SS3) (Retrait – Encapsulage) et sous-section 4 (SS4) (Intervention), ainsi que le taux de mesures pour lesquelles aucune fibre d'amiante n'a été détecté et la concentration moyenne en fibre longues réglementaires.

Pour les matériaux, deux catégories ressortent en particulier, car les nombres de mesures additionnés pour « Toiture – Bardage » et « Revêtement de sol souple : dalle, lé... » représentent un total de 30 % des mesures effectuées (31 % en sous-section 3, et 17 % en sous-section 4), Pour ces matériaux, la proportion de mesures avec aucune fibre détectée varie de 53 à 62 % en sous-section 3 et de 56 à 62 % en sous-section 4.

En complément, les matériaux investigués présentant la plus grande proportion de mesures avec aucune fibre longue détectée dans l'air sont :

- SS3 : Terre et roche amiantifère naturelle (70 %), Revêtement routier (64 %), Joint d'installation domestique ou industrielle - Élément de friction et éléments électriques (64%) ;
- SS4 : Matériels et équipements contaminés (84 %), Revêtement routier (75 %), Terre et roche amiantifère naturelle (74 %), Résidu amianté issu de bâtiment sinistré (tornade - incendie) et de site pollué (74 %), Matériaux contaminés par un matériau amianté (73 %).

Quand des fibres longues d'amiante sont détectées, les matériaux investigués présentant une concentration moyenne en fibres longue inférieure à la VLEP-8h :

- SS4 : Ragréage - Chape maigre (moyenne = 7 F/L), Tresse joint de dilatation ou pied de cloison (moyenne = 8 F/L)

Parmi les techniques investiguées, la « Dépose par le dessus –Déseiboitage – Déconstruction », le « Cassage manuel - Concassage - Burinage - Piquage- Déconstruction avec un outil manuel », le « Nettoyage - Ramassage - Manutention -Conditionnement des déchets amiantés », et la « Dépose par le dessous – Déseiboitage –Déconstruction » sont les techniques les plus mesurées (57 %) (58% en sous-section3 et 44% en sous-section 4). Pour ces techniques, la proportion de mesures avec aucune fibre détectée varie de 31 à 67 % en sous-section 3 et de 6 à 77 % en sous-section 4.

Les techniques investiguées présentant la plus grande proportion de mesures avec aucune fibre longue détectée dans l'air sont :

- SS3 : Déseiboitage – Dépose (100 %), Préparation de la zone - Isolement / Confinement / Déconfinement de la zone (77 %),
- SS4 : Déseiboitage – Dépose (100 %), procédé chimique (81 %)

On retrouve également le prélèvement atmosphérique en SS3 et SS4 (respectivement 95 % et 94 %) bien que ce ne soit pas une technique d'intervention directe ou indirecte sur le matériau.

Quand des fibres longues d'amiante sont détectées, les processus associés aux techniques investiguées présentant une concentration moyenne en fibres longues inférieure à la VLEP sont :

- SS3 : Balayage (5 F/L)
- SS4 : Brossage - Grattage mécanisé (4 F/L)

Par ailleurs, il apparaît important de rappeler ici que des différences en termes de moyens de protection ou de sensibilisation au risque amiante existent entre les sous-sections 3 et 4. La sous-section 3 est réglementairement plus contraignante, les travailleurs sont mieux protégés comparativement à la sous-section 4.

## 5.4 Conclusion

Il n'a pas été identifié de données sur la présence et l'émissivité de FCA depuis les matériaux naturels. Le capacité d'un matériau à libérer des FCA dépend des minéraux en présence, du degré d'altération du matériau et de la nature et de l'intensité des contraintes appliquées au matériau.

Pour les minéraux asbestiformes, les fibres libérées dans l'air sont peu susceptibles de correspondre à des FCA, du moins pour l'essentiel d'entre-elles du fait des caractéristiques de l'amiante. Pour les minéraux non asbestiformes de même nature minéralogique, les fragments de clivage libérés dans l'air peuvent répondre aux critères dimensionnels des FCA. Pour rappel, l'Anses a recommandé en 2015 que le terme particules minérales allongées (PMA) soit employé pour décrire les particules minérales allongées ayant un L/D > à 3, sans prise en compte de leur caractère asbestiforme ou non asbestiforme et que les PMA issues des 5 amphiboles réglementaires à faciès asbestiforme ne soient pas différenciées de leurs 5 homologues non asbestiformes (Anses 2015).

Concernant les matériaux manufacturés, certains matériaux sont connus pour contenir des fibres d'amiante « plus courtes » dès leur production. Ces produits peuvent être regroupés en trois catégories principales :

- Produits de construction et de revêtement : revêtements de toiture, feutres de toiture, autres revêtements, peintures, enduits, mastics, tuiles de plancher, plâtres acoustiques, composés d'asphalte, revêtements de sol, ciments pour joints et isolation, charges dans les carreaux de sol en vinyle, charges minérale fibreuse, charges dans les peintures, papiers et plastiques ;
- Produits automobiles : garnitures de freins moulées, garnitures d'embrayage, production de produits de friction ;
- Autres produits fibreux et plastiques : produits moulés à chaud et à froid, composés thermoplastiques.

Les fibres « plus courtes » se réfèrent dans ce cas à des longueurs macroscopiques et non au seuil de 5 µm communément employé pour différencier les FCA en microscopie.

Par ailleurs, sur le volet des données d'exposition aux FCA en milieu professionnel et d'émissivité des matériaux manufacturés, il n'est pas ressorti de nouvelles données disponibles depuis l'expertise Anses de 2022 à l'exception de la campagne Davinylair. Des résultats d'autres campagnes exploratoires (DGT 2011 et INRS 2022), déjà exploités dans l'expertise Anses de 2022, ont toutefois été repris pour souligner que des concentrations

élevées en FCA pouvaient être mesurées dans l'air pour différentes situations de travail exposant à l'amiante. Cela concerne :

- Certains matériaux : isolants acoustiques, plâtres amiantés, peintures et enduits intérieurs et extérieurs, colles de carrelage mural, flocages, canalisations / toitures / plaques en amiante ciment, mastics, DVA.
- Certaines techniques de retrait ou traitement : sablage, burinage / piquage, ramassage de déchets, rectification / ponçage, grenailage, arrosage, perçage / vissage / carottage / tirage de câbles / décapage, THP-UHP (Très haute pression-ultra haute pression), spatule / raclage, décapage à sec des DVA.

A noter que des empoussièrtements élevés peuvent conduire à des difficultés analytiques et de dénombrement, la présence d'un trop grand nombre de fibres ou d'amas rendant impossible le comptage des fibres individuelles.

La majorité des matériaux pour lesquels des FCA dans l'air sont principalement retrouvées font également partie des matériaux pour lesquels de l'amiante « plus court <sup>14</sup>» a été intégré : peintures et enduits intérieurs et extérieurs, ciment, mastics, toitures, isolants acoustiques, plâtres amiantés, DVA. Cependant, il est tout à fait possible que des FCA soient tout de même émises depuis des matériaux contenant des fibres de longueur plus importante, lors du processus de fragmentation.

De même, sur le volet des mesures d'empoussièrement effectuées dans le cadre des contrôles réglementaires d'exposition aux fibres d'amiante, des matériaux et des techniques fréquemment mis en œuvre ont été identifiés. Parmi les situations ayant fait l'objet du plus grand nombre de mesures certains matériaux sont identifiés comme contenant potentiellement des fibres plus courtes d'amiante ou émettant des FCA dans l'air d'après les résultats de campagnes exploratoires, par exemple :

- Toiture – Bardage – Canalisations – Plaques en amiante ciment ;
- Revêtement de sol ;
- Colle de carrelage ;
- Élément / produit de friction ;
- Enduit – Mastic – Peinture (extérieur / intérieur) – Ciment.

En outre, certaines techniques de retrait ou de traitement sont identifiées comme émettant des FCA dans l'air d'après les résultats de campagnes exploratoires, par exemple :

- Burinage – Piquage ;
- Ramassage ;
- Ponçage ;
- Raclage ;
- Perçage ;
- Rectification.

Ces comparaisons doivent être interprétées avec prudence au regard des incertitudes associées. Les données en FCA restent parcellaires, les campagnes effectuées n'étant pas représentatives et ne couvrant donc pas l'ensemble des matériaux ou techniques. De manière générale, un besoin d'études est signalé.

---

<sup>14</sup> De taille millimétrique

## 6 Cahier des charges pour la mesure des FCA en environnement professionnel

Dans les sections suivantes, des préconisations techniques relatives au mesurage des FCA et des amas de fibres courtes en environnement professionnel sont établies sur la base des connaissances disponibles. Ces préconisations devront impérativement être éprouvées par une étude de faisabilité afin de les ajuster.

### 6.1 Rappel des préconisations émises par l'Anses en 2017 et en 2022

Dès 2009, l'Anses a préconisé de comptabiliser les FCA et a proposé en 2017 des critères d'arrêt de comptage des PMAi courtes dans les 2 protocoles de mesures exploratoires élaborés pour la mesure de PMAi dans les matériaux et dans l'air. En 2022, l'Anses a affiné ses recommandations concernant le comptage des FCA : critères de comptage différenciés pour les fibres longues et courtes en appliquant par défaut pour les fibres courtes les mêmes valeurs que pour les fibres longues. L'Anses a également recommandé d'investiguer la formation des amas de FCA, dont la présence est rarement documentée dans les rapports d'essais, afin de déterminer si ces amas sont présents dans l'aérosol prélevé ou s'ils sont engendrés par le mode de préparation des filtres de prélèvements d'air. Les autres conclusions et recommandations concernent l'exposition et non les méthodes de mesure ou d'analyse.

### 6.2 Nouvelles données disponibles

#### Etude Davinylair (LAFP 2023)

Dans la mesure où le protocole d'analyse des FCA dans l'étude Davinylair suit les recommandations établies par les expertises Anses de 2017 et 2022, il n'a pas été identifié d'informations nouvelles quant aux modalités d'analyse et de dénombrement des FCA. Cette étude a toutefois permis d'apporter des informations qualitatives sur la présence d'amas de FCA dont certains avaient des dimensions de fibres longues.

**Au vu de ces éléments, les conclusions et recommandations établies par l'Anses dans son rapport d'expertise collective d'août 2022 sont toujours valables. Ainsi, les recommandations concernant l'analyse des fibres d'amiante sont reprises en l'état dans la suite du rapport.**

### 6.3 Préconisations techniques concernant l'échantillonnage et le prélèvement des FCA dans l'air en environnement professionnel

A propos de l'échantillonnage et du prélèvement des FCA, aucun élément ne justifie d'appliquer des méthodes différentes de ce qui est déjà réalisé pour les fibres longues réglementaires. Ainsi, il est tout à fait pertinent que l'analyse des fibres longues et courtes soit réalisée à partir d'un même prélèvement. Pour la réalisation de ce prélèvement, il est

recommandé de s'appuyer sur les normes NF X43-269 (2017) et NF X43-050 (2021) ainsi que sur le fascicule de documentation FD X46-033 de mars 2023 (qui a remplacé le guide GA X 46-033 d'août 2012) afin d'assurer un échantillonnage et des prélèvements conformes. La norme NF X43-269 concerne les mesures individuelles tandis que la norme NF X43-050 concerne les mesures à point fixe / mesures environnementales.

A noter qu'il est possible que certains processus engendrent des charges importantes en fibres et particules, entraînant ainsi une saturation des filtres. Cela peut avoir pour conséquence de ne pas pouvoir analyser avec précision les FCA, par exemple si le critère d'arrêt de 100 FCA est atteint sur moins de 4 ouvertures de grille de microscopie. Dans ces cas d'empoussièrtements élevés, les prélèvements ou l'analyse devront être adaptés, par exemple en ajustant les durées de prélèvement ou la fraction de filtre dédiée à la préparation, sans omettre l'objectif initial d'être représentatif d'un processus ou d'une situation (des prélèvements séquencés pourraient être privilégiés par exemple). A ce stade, il n'est pas possible de dresser une liste exhaustive des processus éventuellement concernés, en raison du manque de données d'exposition en FCA dans l'air des lieux de travail tel que signalé en partie 5.3. Dans cette partie, des listes de produits manufacturés contenant potentiellement une proportion plus importante de FCA sont toutefois fournis à titre d'exemple, ainsi que des couples matériaux/techniques pour lesquels des niveaux en FCA élevés ont été retrouvés lors de campagnes exploratoires.

Par ailleurs, à ce jour dans le cas des évaluations de processus, l'ensemble de l'aérosol est prélevé sur opérateur sans sélectionner de fraction granulométrique spécifique. La plupart des dispositifs utilisés, comme par exemple les cassettes ouvertes, n'ont pas fait l'objet de protocoles de tests ou de validation en laboratoire. Avec ces conditions, il n'est pas toujours possible d'obtenir des grilles de microscopie observables et donc exploitables pour l'analyse. Ainsi, le développement d'échantillonneurs haut débit qui permettraient de prélever des fractions granulométriques spécifiques sur opérateur serait pertinent. Pour les mesures en air ambiant, des échantillonneurs ciblant une fraction granulométrique conventionnelle spécifique comme le dispositif de prélèvement CATHIA pour la fraction thoracique, sont déployés et permettent de pallier cette difficulté. Ce dispositif CATHIA a été testé en conditions de laboratoire, sur des aérosols générés pour les tests et avec des débits d'air faibles, il n'est donc pas validé pour certaines situations comme les prélèvements extérieurs.

## **6.4 Préconisations techniques concernant la méthode d'analyse des FCA et des amas de fibres**

### **6.4.1 Méthodes de préparation des échantillons**

A propos de la préparation des échantillons en vue de l'analyse des FCA, aucun élément ne justifie d'appliquer des méthodes différentes de ce qui est déjà réalisé pour les fibres longues réglementaires. Il est recommandé de respecter les préconisations de la norme NF X43-050 pour l'analyse des prélèvements d'air.

En résumé, le substrat de collecte est calciné dans un four à plasma d'oxygène puis les résidus de calcination sont dispersés dans de l'eau distillée avec un traitement acide éventuel. La préparation est ensuite filtrée sur un filtre en polycarbonate préalablement recouvert d'une couche de carbone. Une seconde couche de carbone est ensuite déposée puis la matière est

transférée sur des grilles de microscopie en suivant une procédure de dissolution du filtre (par exemple laveur Jaffe).

Toutefois, il apparaît essentiel de documenter l'impact de cette méthode de préparation sur la génération d'amas de fibres. Il serait intéressant de conduire une étude comparative à propos de l'influence de la méthode de préparation indirecte (NF X 43-050) vis à vis de la méthode directe (NF ISO 10312). Cependant, la méthode directe ne peut pas s'appliquer dès lors que l'empoussièrement est élevé.

#### 6.4.2 Modalités de comptage des fibres

Les modalités de comptage recommandées dans le rapport de l'Anses de 2022 sont reprises en l'état. L'ensemble des fibres respectant les critères dimensionnels suivants sont à considérer :  $L > 0,5 \mu\text{m}$  ; diamètre  $D < 3 \mu\text{m}$  ; rapport  $L/D > 3$ . Il est recommandé de procéder à un comptage différencié des FCA et des fibres longues, en appliquant les modalités de comptage suivantes pour les FCA :

- 1) Le comptage est réalisé sur au moins 2 grilles de microscopie électronique et sur au moins 2 ouvertures de grilles par grille, soit au moins 4 ouvertures de grille ;
- 2) Les critères d'arrêt de comptage sont :
  - a) avoir compté au moins 100 FCA ;ou
  - b) avoir observé un nombre d'ouvertures minimum correspondant à la sensibilité analytique (SA) visée. Celle-ci est de 0,3 FCA/L pour les prélèvements en air ambiant et de 1 FCA/L pour les mesures individuelles en hygiène du travail.<sup>15</sup>

Le comptage des fibres longues doit être poursuivi même si le critère d'arrêt de 100 FCA est atteint, ceci afin de ne pas sous-estimer le nombre de fibres longues. Le comptage des fibres longues est poursuivi jusqu'à atteindre la SA visée ou le nombre de 100 structures fibreuses.

Devoir mesurer les longueurs et diamètres des fibres sur l'ensemble d'une surface peut se révéler extrêmement fastidieux, voire impossible, particulièrement pour les échantillons présentant des niveaux élevés en fibres longues ou courtes ou bien en présence d'agglomérats. Pour pallier cette difficulté, ce comptage différencié pourrait être effectué sur une fraction ou une surface donnée de filtre. Des indications sur les surfaces minimales à considérer de manière à s'assurer d'une représentativité des échantillons sont retrouvées dans la norme NF X43-269 (décembre 2017) ou les essais inter-laboratoires Alasca-Met organisés par l'INRS (vérification de l'absence de fibres sur au moins 0,15% du filtre d'origine, ou avoir analysé une surface correspondant à 0,3 mm<sup>2</sup> de la surface du filtre d'origine).

#### 6.4.3 Modalités de comptage des amas de fibres

Il est important de rappeler que les fibres, qu'elles soient longues ou courtes, ne se présentent pas systématiquement sous forme individuelle. En effet, des regroupements de fibres, voire de particules, sont fréquemment observés. Dans les normes, ces assemblages sont qualifiés de « structures fibreuses d'amiante » et peuvent être de plusieurs types : des faisceaux de

---

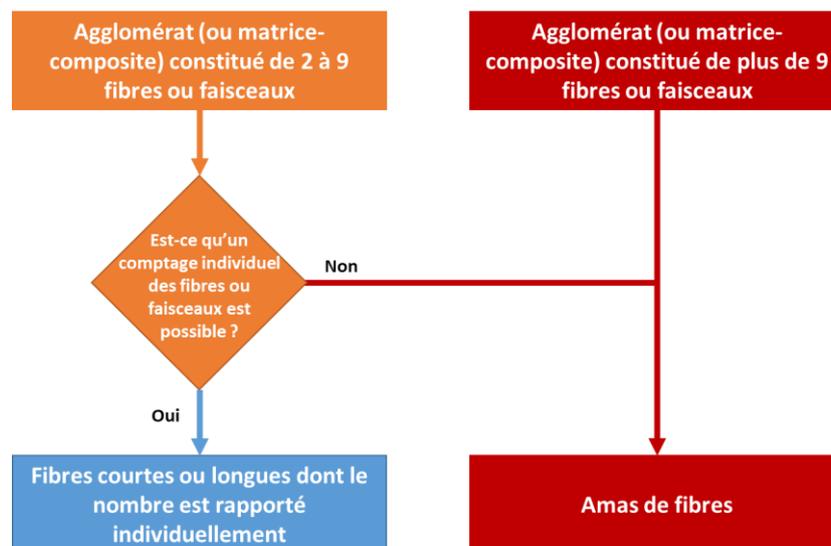
<sup>15</sup> Dans la mesure où il n'existe pas de valeur seuil pour les FCA dans l'air ambiant ni de VLEP pour les FCA, la SA pour les FCA est prise par défaut identique à la SA pour les fibres longues. Ceci permet de comparer les données acquises sur les différentes populations de fibres. Ces valeurs de référence et SA peuvent être amenées à évoluer dans le temps en fonction des réglementations.

fibres, des agglomérats ou des matrices-composites. Dans le cas des agglomérats et des matrices-composites, une qualification supplémentaire est définie avec des structures dites « dispersées » ou « compactes » selon que le dénombrement individuel des fibres ou faisceaux les constituant soit possible ou impossible. Ces définitions sont par exemple reprises dans l'annexe J de la norme NF X43-050 (2021) avec des figures en exemple. Il convient de souligner que les matrices-composites sont constituées de fibres et de particules.

A l'heure actuelle, certains assemblages sont déjà considérés dans les analyses car, selon les règles définies par les normes, toute structure fibreuse est comptabilisée dès lors qu'elle a les dimensions recherchées. Le référencement des différents types de structures est déjà prévu par les normes avec les exemples de fiches d'analyse en annexe H de NF X43-050 qui comprennent une colonne spécifique pour le type de structure. En revanche, le résultat rendu par l'analyse est une valeur globale en fibres par litre, sans précisions sur les types de structures rencontrées dans l'échantillon analysé.

En présence de regroupements de fibres, le résultat du comptage est grandement sous-estimé. En effet, ils peuvent contenir plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de fibres qu'il est impossible de dénombrer séparément. De plus, dans un amas, il devient vite impossible de caractériser la chimie de chaque fibre et il peut arriver d'avoir des mélanges de plusieurs variétés de fibres de chimie différente.

Dans le cadre des présents travaux d'expertise, il est préconisé qu'en complément du comptage différencié des fibres courtes et longues, les amas soient mieux identifiés. Par rapport aux définitions des types de structure fibreuse dans les normes, il est proposé que les structures dites « compactes » soient qualifiées d'amas de fibres, aussi bien les agglomérats que les matrices-composites. Le critère « compactes » correspond à une situation où « les dimensions des fibres individuelles et des faisceaux ne peuvent être mesurés sans ambiguïté » (norme NF ISO 13794). Dans la norme NF ISO 13794, des exemples précis de comptabilisation d'amas sont fournis. Cette même norme décrit un seuil de 9 fibres au-delà duquel le nombre de fibres ou faisceaux constituant la structure est remplacé par un « + ». Ce seuil de 9 fibres pourrait donc être utilisé également pour qualifier une structure fibreuse compacte et donc représentant un amas de fibres, tel que proposé dans la Figure 8 qui illustre le schéma de décision proposé.

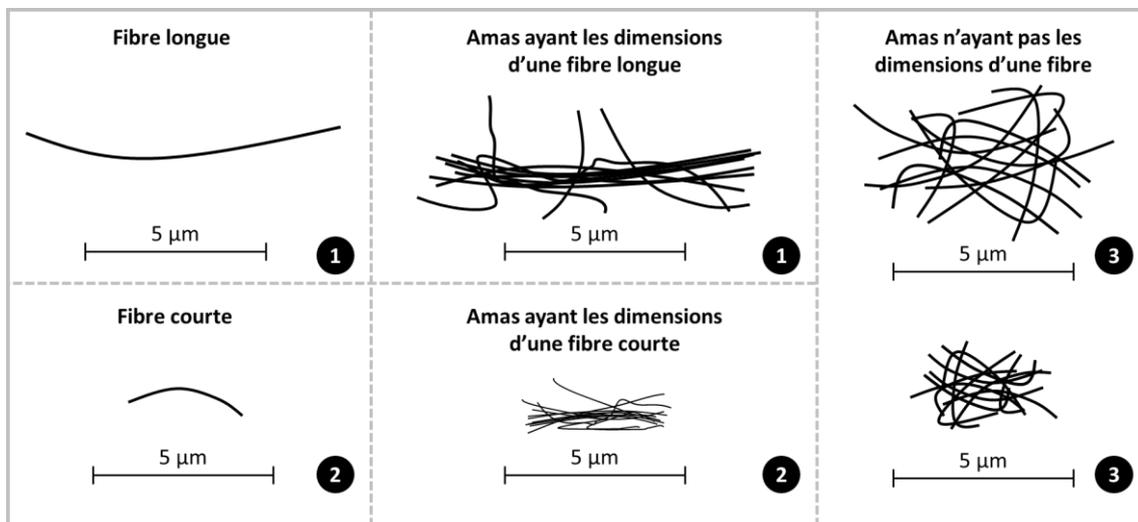


**Figure 8 : Définition du terme "amas de fibres" à partir des terminologies employées dans les normes et proposition de règle de décision**

Ainsi, il est préconisé qu'à mesure que les fibres longues et courtes sont dénombrées, de manière différenciée et avec les critères d'arrêt usuels s'appliquant à chacun, l'ensemble des structures prenant la forme d'amas soient analysées dans le même temps en relevant des critères spécifiques. Les résultats en fibres longues ou courtes resteraient les mêmes, mais des précisions supplémentaires sur les types de structures pourraient être fournies :

- 1<sup>er</sup> type de structure : nombre de structures fibreuses longues, en précisant combien d'amas (ayant les dimensions de fibres longues) sont inclus dans ce résultat et les critères spécifiques de chaque amas ;
- 2<sup>ème</sup> type de structure : nombre de structures fibreuses courtes, en précisant combien d'amas (ayant les dimensions de fibres courtes) sont inclus dans ce résultat et les critères spécifiques de chaque amas ;
- 3<sup>ème</sup> type de structure : nombre et critères spécifiques des autres amas éventuellement identifiés lors de l'analyse, par exemple des amas qui ne respecteraient pas le rapport minimal d'allongement de 3.

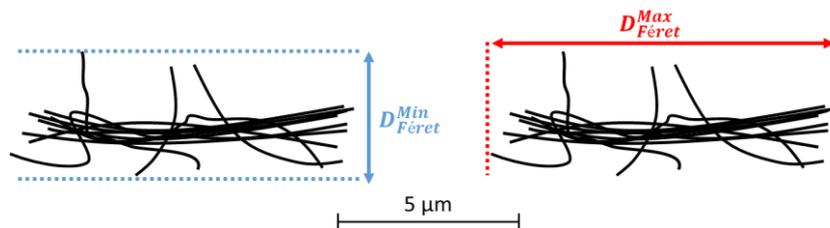
Ces différents types de structures sont schématisés en Figure 9.



**Figure 9 : Typologie des structures de fibres rencontrées dans les analyses**

Les critères spécifiques aux amas qui pourraient être renseignés sont d'ordre dimensionnel : par exemple les longueurs ou diamètres moyens, les diamètres de Féret minimum et maximum, ou encore une évaluation de la surface.

Les diamètres de Féret minimum et maximum sont définis de la sorte : « Le diamètre de Féret maximum  $D_{\max}^{\text{Féret}}$  (respectivement minimum  $D_{\min}^{\text{Féret}}$ ) est la distance entre les deux points les plus éloignés (respectivement les plus proches) sur les frontières de l'objet » (Hosdez, 2017) (cf. Figure 10). Les diamètres de Féret permettent une meilleure caractérisation de la forme des objets.



**Figure 10 : représentation schématique des diamètres de Féret appliqués à un amas ayant les dimensions d'une fibre longue (source : adapté de Hosdez, 2017)**

Par ailleurs, la surface des amas pourrait être un critère pertinent à évaluer. Il est possible d'évaluer des surfaces à l'aide de logiciels de traitement d'image ou d'outils en ligne (Merouane, 2024). Dans certains cas, il est possible de simplifier ou d'automatiser une partie de la procédure en entraînant ces outils sur une base d'images. Par contre, dans le cas d'amas sous la forme de matrices-composites, la surface calculée inclurait à la fois des fibres et des particules. De plus, l'analyse par microscopie ne permet qu'une projection des fibres depuis un espace à 3 dimensions sur un espace en 2 dimensions, ce qui est à considérer pour l'interprétation des surfaces calculées.

Afin d'illustrer la manière dont pourraient se présenter les résultats d'analyse, l'exemple fictif suivant est proposé (Tableau 6).

Deux grilles de MET d'un échantillon d'air sont analysées pour caractériser les fibres longues, les FCA ainsi que les amas. Les amas ont été caractérisés en évaluant pour chacun les diamètres de Féret minimum et maximum. Après exploration d'un nombre d'ouvertures suffisant pour atteindre les SA visées pour les fibres longues et pour les FCA, le résultat suivant est rendu :

**Tableau 6 : Exemple fictif de caractérisation des amas**

Type de structures	Résultat total	Caractérisation des amas
N°1 : fibres longues d'amiante	10 fibres longues d'amiante dénombrées au total dont 4 amas comptés comme des fibres longues	Amas n°1 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 10 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 3 \mu\text{m}$
		Amas n°2 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 8 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,5 \mu\text{m}$
		Amas n°3 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 21 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 5 \mu\text{m}$
		Amas n°4 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 13 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 2,3 \mu\text{m}$
N°2 : FCA	45 FCA dénombrées au total dont 8 amas comptés comme des FCA	Amas n°1 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 4 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 1,1 \mu\text{m}$
		Amas n°2 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 4,5 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,5 \mu\text{m}$
		Amas n°3 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 3 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,7 \mu\text{m}$
		Amas n°4 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 2,9 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,8 \mu\text{m}$
		Amas n°5 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 3,8 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,7 \mu\text{m}$
		Amas n°6 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 4,5 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 1 \mu\text{m}$
		Amas n°7 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 2,7 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,6 \mu\text{m}$
		Amas n°8 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 4 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,7 \mu\text{m}$
N°3 : autres amas	3 autres amas identifiés	Amas n°1 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 5,5 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 4,5 \mu\text{m}$
		Amas n°2 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 2 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 1 \mu\text{m}$
		Amas n°3 : $D_{\max}^{\text{Féret}} = 1,2 \mu\text{m}$ et $D_{\min}^{\text{Féret}} = 0,9 \mu\text{m}$

Dans tous les cas, il est rappelé que les recommandations du rapport Anses de 2022 restent d'actualité : renseigner systématiquement la présence d'amas, réaliser des comparaisons entre prélèvements avec les méthodes directe (NF ISO 10312) ou indirecte (NF X 43-050),

identifier la meilleure manière de qualifier ces amas (nombre de fibres, d'amas, surface, etc.) pour représenter l'exposition.

Au moment de l'implémentation et dans le cadre d'essais interlaboratoires, le groupe de travail préconise que les protocoles de dénombrement et de mesurage soient testés sur des images issues de cas réels. Ces tests permettraient une harmonisation des pratiques entre les laboratoires réalisant les analyses.

A noter que le développement des systèmes basés sur l'intelligence artificielle et le traitement d'images vont potentiellement modifier les méthodes actuellement mises en œuvre. Certains essais pour les méthodes de comptage sont conduits afin de faciliter le dénombrement des fibres ou de gagner en temps d'analyse. Cela est par exemple le cas des études de Cai *et al.* (2021) ou de Rabiee *et al.* (2023) qui ont testé un mécanisme d'apprentissage (modèle YOLO pour *You Only Look Once*), à partir d'images obtenues en MOCP et comparaison avec comptage classique et ont obtenu des résultats de dénombrement automatique des fibres d'amiante (chrysotile et crocidolite). Dans ces exemples, uniquement les fibres longues étaient considérées. Par ailleurs, ces méthodes sont basées sur la morphologie et comptent des fibres mais sans caractériser la nature chimique et amiantifère des fibres.

## 7 Moyens de protection collective

### 7.1 Rappel des conclusions Anses 2011 sur les moyens de protection collective (MPC) et équipements de protection individuels (EPI)

Le rapport de l'Anses de 2011 sur l'évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante concluait à l'absence d'information précise concernant les efficacités de filtration spécifiquement pour les FCA (Anses 2011). Plus particulièrement :

- La majeure partie des études portait exclusivement sur les APR et non pas sur les vêtements de protection ou sur les dispositifs de protection collective. Ainsi, très peu d'études avaient été recensées concernant l'évaluation de l'efficacité de protection des équipements de protection collective vis-à-vis de l'amiante.
- A propos de l'efficacité des filtres dans des APR, au regard du peu de données disponibles, il semblait que les aérosols de fibres d'amiante soient mieux retenus par les filtres que les aérosols d'essais normalisés. Néanmoins, la plupart des études recensées faisaient appel à la MOCP pour le comptage des fibres d'amiante et ne fournissaient donc aucune information quant aux performances des EPI vis-à-vis des FCA. Seule une étude avait été réalisée en microscopie électronique à balayage par transmission et avait permis de comptabiliser les FCA. Il n'était donc pas possible de conclure sur l'efficacité de filtration au regard des FCA.
- À propos des méthodes mises en œuvre dans les études, le pourcentage de pénétration dans l'appareil respiratoire avait été déterminé en fonction du diamètre des fibres plutôt qu'en fonction de leur longueur, puisque le diamètre aérodynamique d'une fibre dépend essentiellement de son diamètre géométrique et non de sa longueur.
- À propos des filtres à haute efficacité / très haute efficacité, il semblait que la filtration des fibres d'amiante soit supérieure à celle des aérosols utilisés dans les essais normatifs.
- Suite à l'analyse des études disponibles, il semblait que l'efficacité de filtration d'aérosols constitués de particules fibreuses soit supérieure à l'efficacité de filtration d'aérosols constitués de particules sphériques.
- Suite à l'analyse des études disponibles, l'efficacité de filtration d'un aérosol porteur de charges électrostatiques était supérieure à l'efficacité de filtration d'un aérosol neutre. Il était noté que les aérosols d'amiante sont des aérosols chargés.

### 7.2 Nouvelles données disponibles

La recherche bibliographique menée telle que décrite dans le chapitre 3 n'a pas permis d'identifier de nouvelle publication pertinente au sujet des MPC pour les FCA depuis l'expertise de l'Anses de 2011. La plupart des travaux connus du groupe de travail concernent les EPI qui n'entrent pas dans le champ de la présente expertise. Pour autant, certains éléments

généraux relatifs aux efficacités de filtration et aux comportements des fibres comparativement aux particules seront repris. Cependant, les problématiques en lien avec le port ou l'entretien des EPI ne seront pas abordées, par exemple la pénétration de fibres *via* des fuites vers l'intérieur des masques respiratoires.

Dans une publication de 2006, l'INRS décrivait la filtration des aérosols et la performance des médias filtrants (INRS 2006). Plusieurs mécanismes expliquent l'efficacité de capture des aérosols par un milieu fibreux et dépendent généralement des diamètres aérodynamiques des particules :

- La diffusion brownienne est un mécanisme par lequel de petites particules en suspension dans un flux d'air se déplacent de manière aléatoire, entrant en collision avec les molécules d'air et changeant de direction. Les particules de très petite taille, généralement inférieures à 0,1  $\mu\text{m}$ , ont tendance à être davantage influencées par la diffusion.
- L'interception directe se produit lorsque des particules plus grosses (diamètre > 0,1  $\mu\text{m}$ ), souvent proches de la taille des pores du filtre, sont capturées lorsqu'elles passent à proximité des fibres du filtre. Elles sont interceptées si la distance entre la ligne de courant et la fibre est inférieure au rayon de la particule. Les particules interceptées sont généralement légèrement plus petites que les pores du filtre, mais suffisamment grandes pour être capturées lorsqu'elles entrent en contact avec les fibres.
- L'impaction se produit pour des particules encore plus grosses (diamètre > 0,1  $\mu\text{m}$ ), possédant une certaine inertie. Ces particules ne peuvent pas suivre un flux d'air courbé et heurtent directement les fibres du filtre, où elles sont capturées. Les particules plus volumineuses, généralement supérieures à 0,4  $\mu\text{m}$ , sont principalement influencées par l'impaction.
- L'effet électrostatique peut également jouer un rôle dans la capture en modifiant les trajectoires des particules, en altérant l'adhérence, le rebond, ou en agissant sur le phénomène de colmatage. Une particule passant à proximité des fibres du filtre peut être déviée par les forces électrostatiques et s'y fixer.

Ce sont surtout les 3 premiers mécanismes qui expliquent pour l'essentiel l'efficacité totale de filtration. Le MPPS (Most Penetrating Particle Size ou taille de la particule la plus pénétrante) correspond à la taille de particule pour laquelle l'efficacité de filtration est la plus faible. C'est le diamètre des particules qui pénètrent le mieux à travers un filtre donné. Les filtres ont souvent une efficacité de filtration plus élevée pour des particules plus petites ou plus grandes que la taille MPPS. Les particules proches de la taille des pores du filtre, y compris celles autour du MPPS, ont souvent des efficacités de filtration plus faibles car elles peuvent contourner ou pénétrer plus facilement le filtre. Ainsi, les filtres ont des efficacités minimales lorsque les particules ont des tailles comprises entre 0,1  $\mu\text{m}$  et 0,5  $\mu\text{m}$ . C'est dans cette gamme de taille que sont déterminées les efficacités de filtration des filtres à très haute efficacité.

Ces notions théoriques concernent des particules. Pour le cas d'aérosols composés de fibres, les quelques références publiées depuis l'expertise de l'Anses de 2011 confortent le fait que l'efficacité de filtration serait meilleure pour des aérosols de particules fibreuses par rapport à un aérosol de particules sphériques de diamètres aérodynamiques équivalents :

- La publication de Cho *et al.* (2013) a évalué les différences de pénétration entre des fibres et des particules sphériques au travers d'un filtre de masque respiratoire. Les fibres avaient une longueur médiane de 4,9  $\mu\text{m}$ , un diamètre moyen de 1  $\mu\text{m}$  et un

diamètre aérodynamique calculé de 1,73  $\mu\text{m}$ . Les auteurs concluent que les particules sphériques pénètrent 1,1 à 1,5 fois plus que les fibres. Sur les questions de longueurs de fibre, il est mentionné que ce paramètre a une faible influence sur les comportements aérodynamiques.

- A l'occasion de mesures de facteur de protection en situation de travail simulé conduites par l'Organisation néerlandaise pour la recherche scientifique appliquée (TNO) en 2017, la question de la filtration des fibres a été abordée. Il est indiqué qu'il est probable qu'il soit plus difficile pour une fibre de passer à travers un filtre que pour une particule sphérique de même diamètre physique. Les auteurs concluent donc que sur la base de ce raisonnement, il est probable que les facteurs de protection basés sur les particules constituent une représentation conservatrice (pire scénario) des facteurs de protection réels pour l'amiante, sous réserve que d'autres facteurs n'influencent pas la capture des particules, tels que les processus d'adsorption (TNO 2017).
- La publication de Meyer-Plath *et al.* (2020) aborde les questions de modalités de comptage des fibres d'amiante mais principalement sous le spectre du diamètre et non de la longueur. Les auteurs mentionnent tout de même des efficacités de filtration qui dépendent des longueurs et débits. Ils concluent que la filtration par impact inertiel et l'interception (au bord des pores du filtre) augmentent en fonction de la longueur des fibres et des débits d'air. Ainsi, les fibres plus longues et des débits d'air plus élevés entraîneraient de meilleures efficacités de filtration.

### 7.3 Conclusion

Ainsi, d'après les quelques études expérimentales existantes et comme déjà conclu par l'expertise de l'Anses de 2011, les fibres semblent être mieux filtrées que les sphères de diamètres aérodynamiques correspondantes. De plus, la théorie prévoit que plus on descend en longueur et en diamètre, plus on s'approche du comportement des particules. Par conséquent, les FCA devraient avoir des comportements assimilables à ceux des particules et il serait possible d'appliquer les modèles théoriques d'efficacité de filtration/collection, avec des efficacités attendues similaires.

## 8 Discussion et conclusion du groupe de travail

Il n'a pas été identifié de nouvelle étude épidémiologique sur l'exposition des travailleurs aux FCA. Le groupe de travail rappelle que les études expertisées en 2022 mettaient en évidence un effet possible des FCA, avec des difficultés d'interprétation. En effet, en l'état des connaissances, il n'est pas possible de savoir si les effets sanitaires observés chez les travailleurs exposés à des FCA sont principalement liés à un effet des fibres longues, à une interaction biologique entre les fibres longues et les fibres courtes, ou à un effet propre aux fibres courtes. Pour statuer sur le danger des FCA, il serait nécessaire de disposer d'études menées sur des populations exposées exclusivement (ou quasi-exclusivement) aux FCA. A ce jour, la seule population de travailleurs connue comme étant exposée quasi-exclusivement aux FCA est celle des travailleurs nettoyant des dalles de sol en vinyle amiante (DVA) à l'aide de monobrosses. Parmi ces populations, les agents de service hospitalier (ASH) sont particulièrement d'intérêt pour étudier les effets sanitaires des FCA car il n'existe habituellement pas d'autre exposition professionnelle à l'amiante que le nettoyage des DVA. Cependant, les données disponibles ne permettent pas de conclure sur un éventuel effet des FCA sur le risque de mésothéliome. L'acquisition de données d'exposition professionnelle aux FCA est essentielle avant d'envisager la réalisation de nouvelles études épidémiologiques. Dans le cas où les travailleurs sont exposés à un mélange de FCA et de fibres longues, il est nécessaire que les résultats des études soient exprimés en fonction de la composition de l'aérosol pour pouvoir comparer les risques en fonction de la granulométrie des fibres. Cette approche est la plus adaptée pour estimer l'effet des FCA en tenant compte de l'effet des fibres longues.

Les deux nouvelles études *in vitro* identifiées dans la littérature confirment que même si les FCA ont un effet moindre que celui des fibres longues, elles sont biologiquement actives et par conséquent, que leurs effets pathologiques ne peuvent pas être exclus. Ces résultats sont soutenus par plusieurs études sur les nano-fils d'argent « courts », même si ceux-ci ne peuvent pas être directement extrapolés aux FCA. La réalisation de nouvelles études *in vitro* de cytotoxicité ou de génotoxicité apporterait des éléments partiels intéressants et utiles sur la toxicité des FCA mais cela nécessite d'étudier au préalable la possibilité de constituer des échantillons de FCA sans avoir recours à une sélection des FCA au moyen de traitements susceptibles de modifier leurs propriétés intrinsèques.

Le groupe de travail rappelle en outre que les caractéristiques dimensionnelles ne sont pas les seuls paramètres responsables de la toxicité de l'amiante. D'autres paramètres comme la réactivité de surface ou la composition chimique conditionnent l'interaction avec les cellules et/ou la réponse cellulaire et contribuent aux effets observés. Par ailleurs, il est possible que la présence de FCA en grand nombre puisse influencer la réponse biologique aux fibres longues. Enfin, les FCA peuvent former des structures en amas et des faisceaux, dont le devenir dans l'organisme et les impacts biologiques ne sont pas documentés.

Au final, les conclusions de 2022 restent inchangées : malgré des difficultés d'interprétation, les données chez l'humain vont dans le sens d'un effet sanitaire des FCA. Les quelques nouvelles données expérimentales confirment que les FCA ont des effets biologiques propres.

Aucune nouvelle donnée d'exposition professionnelle aux FCA n'a été identifiée dans la littérature, à l'exception de l'étude Davinylair. Cette étude confirme que les travailleurs nettoyant les DVA sont exposés quasi exclusivement aux FCA, à des concentrations élevées.

Il n'a pas été identifié de données d'émissivité en FCA depuis les matériaux naturels dans la littérature. Des données d'émissivité en PMAi courtes depuis des matériaux naturels seront prochainement disponibles via le projet « CARTO PMAi » coordonné par l'Organisme Professionnel Prévention Bâtiment Travaux Publics (OPPBTP).

Les données concernant les matériaux manufacturés sont très parcellaires. Il est possible d'identifier des catégories de matériaux dans lesquels des fibres d'amiante « plus courtes » ont été intégrées (peintures, enduits, mastics, ciments pour joints et isolation, plâtres acoustiques, revêtements de toiture, de sol, charges dans les carreaux de sol en vinyle). Les données d'émissivité disponibles confirment une forte proportion de FCA dans les mesures d'émissivité réalisées lors de diverses interventions sur certains de ces matériaux. Cependant, les données disponibles montrent également que des FCA peuvent être émises en quantité importante depuis des matériaux contenant préférentiellement des fibres longues. A noter que ces données sont pour la plupart issues d'études qui n'avaient pas pour objectif de mesurer les FCA, ce qui a pu engendrer des difficultés analytiques et conduire à une incertitude plus grande sur les résultats.

Comme souligné en 2022, il n'existe pas de protocole harmonisé pour le prélèvement et l'analyse des FCA. Aucun élément ne justifie d'appliquer des méthodes différentes de ce qui est déjà réalisé pour les fibres longues concernant l'échantillonnage, le prélèvement et l'analyse d'échantillons d'air. Des précisions sur le comptage différencié des FCA et des fibres longues et sur la prise en compte spécifique des amas ont été apportées par le groupe de travail.

En conclusion, les connaissances et données disponibles sont insuffisantes pour envisager actuellement une révision de la VLEP-8h pour intégrer le décompte des FCA, et une re-définition des niveaux réglementaires d'empoussièrtements pour tenir compte des FCA. Néanmoins il existe des situations pour lesquelles la VLEP-8h est respectée alors que les travailleurs sont exposés aux FCA. Ces situations justifieraient la mise en place de mesures de prévention.

## 9 Recommandations

### ▪ **Recommandations en matière de prévention des risques professionnels**

Le groupe de travail recommande :

- De veiller à ce que les niveaux d'exposition aux fibres longues et aux FCA soient les plus bas possibles. La présence de fibres d'amiante longues ou courtes doit impliquer des mesures de prévention ;
- D'établir, une fois des données métrologiques obtenues, une VLEP pragmatique<sup>16</sup> visant à limiter les expositions professionnelles aux FCA et à mettre en œuvre des mesures de prévention ;
- Que des études complémentaires et spécifiques aux FCA soient menées sur l'efficacité des moyens de protection collective.

### ▪ **Recommandations pour l'acquisition de données d'exposition professionnelle aux FCA**

Le groupe de travail recommande :

- De mesurer les FCA et les amas de fibres en même temps que les fibres longues dans les environnements professionnels dans le but d'alimenter une base de données documentant les concentrations en FCA pour les différents processus. Dans un premier temps, une étude visant à ré-analyser les filtres d'échantillons d'air ou grilles de microscopie électronique disponibles dans les laboratoires accrédités pour la mesure d'empoussièrement en fibres d'amiante pourrait être menée.
- En complément, il pourrait être intéressant de mesurer les longueurs et diamètres et d'établir la granulométrie complète des fibres comptées. Dans ce cas, l'ensemble des fibres d'amiante respectant les critères dimensionnels ( $L > 0,5 \mu\text{m}$  ; diamètre  $D < 3 \mu\text{m}$  ; rapport  $L/D > 3$ ) seraient à dénombrer et à mesurer, afin d'obtenir une fréquence d'occurrence en fonction des longueurs et diamètres de fibres.

Pour la réalisation d'une telle étude, il est recommandé :

- De s'appuyer sur le cahier des charges proposé dans le cadre de cette expertise pour la mesure des FCA et des amas ;
- D'investiguer en priorité les processus ou les couples matériaux/techniques les plus fréquemment mis en œuvre.

### ▪ **Recommandations en matière de recherche**

**Les recommandations de 2022 en matière de recherche restent valables et ont été complétées au regard des constats de cette expertise.**

Ainsi, pour l'étude des effets sanitaires des FCA, le groupe de travail recommande :

- Que la surveillance épidémiologique du mésothéliome inclut les expositions aux FCA et privilégie les analyses portant sur les populations exposées à ces fibres ;
- Que des études épidémiologiques soient mises en place sur des populations quasi-exclusivement exposées aux FCA quand les données d'exposition le permettront ;

---

<sup>16</sup> En l'absence de données quantitatives suffisantes pour établir une valeur, il est possible de recommander des VLEP dites pragmatiques, proposées dans un objectif de prévention (Anses 2017b).

- Que les résultats des études épidémiologiques sur les populations exposées à l'amiante soient exprimés de façon à permettre les analyses par classes granulométriques.

Pour la conduite d'études expérimentales, le groupe de travail recommande :

- De développer une méthode de sélection des FCA n'altérant pas leurs propriétés intrinsèques ;
- De réaliser, avec des échantillons adéquats, des études pour documenter le potentiel génotoxique ;
- De réaliser les tests *in vitro* permettant de mieux comprendre les possibles interactions entre fibres courtes et fibres longues (voire avec d'autres particules présentes dans des milieux de travail complexes).

Concernant la problématique des amas identifiés lors de la lecture au microscope, le groupe de travail recommande :

- Que la formation des amas soit investiguée afin de déterminer s'ils sont liés à la nature du matériau, au type de technique appliquée au matériau ou à son usure, et/ou s'ils sont attribuables aux modalités de préparation des échantillons. Pour cela, il est recommandé d'effectuer des prélèvements en parallèle et de les comparer en préparant les filtres selon la méthode directe (ISO 10312:2019) et selon la méthode indirecte (NF X 43-050). A noter qu'une telle étude n'est possible que pour des empoussièrtements faibles.

**Date de validation du rapport d'expertise collective par le groupe de travail et par le comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » : 25 avril 2024.**

# 10 Bibliographie

## 10.1 Publications

Allen EM, Alexander BH, MacLehose RF, Nelson HH, Ramachandran G, Mandel JH. 2015b. Cancer incidence among Minnesota taconite mining industry workers. *Ann Epidemiol* 25 (11): 811-5.

Allen EM, Alexander BH, MacLehose RF, Nelson HH, Ryan AD, Ramachandran G, Mandel JH. 2015a. Occupational exposures and lung cancer risk among Minnesota taconite mining workers. *Occup Environ Med* 72 (9): 633-9.

Allen EM, Alexander BH, MacLehose RF, Ramachandran G, Mandel JH. 2014. Mortality experience among Minnesota taconite mining industry workers. *Occup Environ Med* 71 (11): 744-9.

Anses. 2009. Les fibres courtes et les fibres fines d'amiante - prise en compte du critère dimensionnel pour la caractérisation des risques sanitaires liés à l'inhalation d'amiante. 394 p. Maisons-Alfort, France.

Anses. 2011. Évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante. 115 p. Maisons-Alfort, France.

Anses. 2015. Effets sanitaires et identification des fragments de clivage d'amphiboles issus des matériaux de carrière. Rapport d'expertise collective. 218 p. Maisons-Alfort, France.

Anses. 2017a. Particules minérales allongées. Identification des sources d'émission et proposition de protocoles de caractérisation et de mesures. 164 p. Maisons-Alfort, France.

Anses. 2017b. Valeurs limites d'exposition professionnelles. Document de référence pour l'élaboration de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel. 142 p. Maisons-Alfort, France.

Anses 2022. Fibres courtes d'amiante et autres particules minérales allongées de moins de 5 micromètres de longueur Mise à jour des données sanitaires et d'exposition hors évaluation des risques. Rapport d'expertise collective. 144 p. Maisons-Alfort, France.

Anses – BRGM – INRS - LAFP. 2018. Analyse des émissions en particules minérales allongées (PMA) et en silice cristalline générées lors de tests d'usure soumis à des matériaux naturels en laboratoire. Convention de Recherche et Développement Anses n°2016-CRD-11. 237 pp.

Barbeau *et al.*, 1979 Cours Intensif sur les Techniques de Détermination Minéralogique de l'Amiante . Association minéralogique du Canada. 309 p.

Bernstein DM, Donaldson K, Decker U, Gaering S, Kunzendorf P, Chevalier J, Holm SE. 2008. A Biopersistence Study following Exposure to Chrysotile Asbestos Alone or in Combination with Fine Particles. *Inhalation Toxicology*. 20:11: 1009-1028.

Bernstein DM, Rogers RA, Sepulveda R, Donaldson K, Schuler D, Gaering S, Kunzendorf P, Chevalier J, Holm SE. 2011. Quantification of the pathological response and fate in the lung and pleura of chrysotile in combination with fine particles compared to amosite-asbestos following short-term inhalation exposure. *Inhalation Toxicology*. 23:7 : 372-391.

Bernstein DM, Rogers R, Sepulveda R, Kunzendorf P, Bellman B, Ernst H, Phillips JI. 2014. Evaluation of the deposition, translocation and pathological response of brake dust with and

without added chrysotile in comparison to crocidolite asbestos following short-term inhalation: Interim results. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 276: 28 – 46.

Bernstein DM, Rogers R, Sepulveda R, Kunzendorf P, Bellman B, Ernst H, Creutzenberg O, Phillips JI. 2015. Evaluation of the fate and pathological response in the lung and pleura of brake dust alone and in combination with added chrysotile compared to crocidolite asbestos following short-term inhalation exposure. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 283: 20-34.

Bernstein DM, Toth B, Rogers RA, Sepulveda R, Kunzendorf P, Phillips JI, Ernst H. 2018. Evaluation of the dose-response and fate in the lung and pleura of chrysotile containing brake dust compared to chrysotile or crocidolite asbestos in a 28- day quantitative inhalation toxicology study. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 351: 74-92.

Bernstein DM, Toth B, Rogers RA, Kunzendorf P, Phillips JI, Schaudien D. 2021. Final results from a 90-day quantitative inhalation toxicology study evaluating the dose-response and fate in the lung and pleura of chrysotile-containing brake dust compared to TiO<sub>2</sub>, chrysotile, crocidolite or amosite asbestos: Histopathological examination, confocal microscopy and collagen quantification of the lung and pleural cavity. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 424:115598.

Bernstein DM. 2022. The health effects of short fiber chrysotile and amphibole asbestos. *Critical Reviews in Toxicology*, 52:2, 89-112.

Brevet. 1979. United State Patent. Method of preparation of an asbestos product. 7p.

BRGM. 1997. Memento roches et minéraux industriels : amiante. 63 p.

Bruno MR, Cannizzaro A, Olori A, Tombolini F, Angelosanto F, Sinopoli F, Bruni BM, Casalnuovo F, Campopiano A. 2023. Size characteristics of asbestiform fibers in lung tissue of animals that grazed in areas rich in ophiolitic outcrops in Central Calabria (Southern Italy). *Sci. Total Environ.* 856:15906.

Cai C, Nishimura T, Hwang J, Hu XM, Kuroda A. 2021. Asbestos Detection with Fluorescence Microscopy Images and Deep Learning. *Sensors* 21 (13): 4582.

Cho KJ, Turkevich L, Miller M, McKay R, Grinshpun SA, Ha K, Reponen T. 2013. Penetration of Fiber Versus Spherical Particles Through Filter Media and Face Seal Leakage of N95 Filtering Facepiece Respirators with Cyclic Flow. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 10 (3): 109-15.

Chung KF, Seiffert J, Chen S, Theodorou IG, Goode AE, Leo BF, McGilvery CM, Hussain F, Wiegman C, Rossios C, Zhu J, Gong J, Tariq F, Yufit V, Monteith AJ, Hashimoto T, Skepper JN, Ryan MP, Zhang J, Tetley TD, Porter AE. 2017. Inactivation, clearance, and functional effects of lung-instilled short (1.5 µm) and long (10 µm) silver nanowires in rats. *ACS Nano* 11 : 2652-2664.

CIRC. 2012. Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans - Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite and anthophyllite). No. 100C. International Agency for Research on Cancer (Centre International de Recherche contre le Cancer) (Lyon, France).

Cook PM, Palekar LD, Coffin DL. 1982. Interpretation of the carcinogenicity of amosite asbestos and ferroactinolite on the basis of retained fiber dose and characteristics in vivo. *Toxicol Lett.* 13(3-4):151-8. doi: 10.1016/0378-4274(82)90203-x. PMID: 6293119

Coffin DL, Palekar LD, Cook PM. 1983. Correlation of in vitro and in vivo methods by means of mass dose and fiber distribution for amosite and fibrous ferroactinolite. *Environ Health Perspect.* 51:49-53. doi: 10.1289/ehp.835149. PMID: 6315381

- CSTB. 2013. Fibres courtes d'amiante : étude exploratoire dans différents lieux de vie. Convention de Recherche et Développement Anses n°2011-CRD-05. 43 pp.
- Cyphert JM, Padilla-Carlin DJ, Schladweiler MC, Shannahan JH, Nyska A, Kodavanti UP, Gavett SH. 2012a. Long-term response of rats to single intratracheal exposure of Libby amphibole or amosite. *J.Toxicol.Environ.Health A* 75, 183-200.
- Cyphert JM, Nyska A, Mahoney RK, Schladweiler MC, Kodavanti UP, Gavett, SH. 2012b. Sumas Mountain chrysotile induces greater lung fibrosis in Fischer344 rats than Libby amphibole, El Dorado tremolite, and Ontario ferroactinolite. *Toxicol.Sci.*130, 405-415.
- Cyphert JM, Carlin DJ, Nyska A, Schladweiler MC, Ledbetter AD, Shannahan JH, Kodavanti UP, Gavett SH. 2015. Comparative long-term toxicity of Libby amphibole and amosite asbestos in rats after single or multiple intratracheal exposures. *J.Toxicol.Environ.Health A* 78, 151-165.
- Cyphert JM, MCGee MA, Nyska A, Schladweiler MC, Kodavanti UP, Gavett SH. 2016. Long term toxicity of naturally occurring asbestos in male Fischer 344 rats. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 79(2): 49-60.
- DGS. 2014. Etude de l'émission de fibres d'amiante lors de l'entretien de dalles de sol en vinyle amiante. Rapport d'étude 2014/A/8. N°LEPI : 1100. Convention de prestation pour la DGS du 18 novembre 2011. 71 p.
- DGS-LAFP-CRAMIF-INRS-CTIP. 2019. Etude des exposition professionnelles et environnementales aux fibres d'amiante lors de la mise en œuvre de processus d'entretien de dalles de sol en vinyle amiante. Rapport d'étude 2016/A/25. 133 pp.
- Duncan K, Ghio A, Dailey L, Bern A, Gibbs-Flournoy E, Padilla-Carlin D, Roggli V, Devlin R. 2010. Effect of size fractionation on the toxicity of amosite and Libby amphibole asbestos. *Toxicol.Sci.*118, 420-434.
- Duncan KE, Cook PM, Gavett SH, Dailey LA, Mahoney RK, Ghio AJ, Roggli VL, Devlin RB. 2014. In vitro determinants of asbestos fiber toxicity: effect on the relative toxicity of Libby amphibole in primary human airway epithelial cells. *Part. Fibre Toxicol.*11, 1-14.
- Goodman JE, Becich MJ, Bernstein DM, Case BW, Mandel JH, Nel AE, Nolan R, Odo NU, Smith SR, Taioli E, Gibbs G. 2023. Non-asbestiform elongate mineral particles and mesothelioma risk: Human and experimental evidence. *Environ. Res.* 230: 114578.
- Gualtieri AF, Mirata S, Almonti V, Bassi AM, Meo C, Scarfi S, Zapparoli M, Armeni T, Cianfruglia L, Marzioni D, Fantone S, Tossetta G, Stipa P, Laudadio E, Sabbatini S, Minnelli C, Di Valerio S, Vaiasicaa S, Procopio AD, Pugnalone A. 2023. *In vitro* toxicity of short vs long chrysotile fibres. *Periodico di Mineralogia* (2023) 92, 203-222
- Hamra, G. B., D. Loomis et J. Dement. 2014. Examining the association of lung cancer and highly correlated fibre size-specific asbestos exposures with a hierarchical Bayesian model. *Occup Environ Med* 71 (5): 353-7.
- Hamra, G. B., D. B. Richardson, J. Dement et D. Loomis. 2017. Lung Cancer Risk Associated with Regulated and Unregulated Chrysotile Asbestos Fibers. *Epidemiology* 28 (2): 275-280.
- Hosdez J. 2017). Fissuration par fatigue de fontes à graphite sphéroïdal et vermiculaire : caractérisation des effets de la plasticité et d'un vieillissement thermique.
- Huh D-A, Chae W-R, Choi Y-H, Kang M-S, Lee Y-J, Moon K-W. 2022. Disease Latency according to Asbestos Exposure Characteristics among Malignant Mesothelioma and Asbestos-Related Lung Cancer Cases in South Korea. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(23): 15934.

- INRS. 2006. Filtration des aérosols – performance des médias filtrants – ND 241-202-06.
- INRS. 2011. Campagne de mesures d'exposition aux fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META) - rapport final.
- INRS. 2022. Synthèse des données de mesurage en fibres courtes d'amiante obtenues dans le cadre de la campagne INRS pour la détermination des facteurs de protection assignés des appareils de protection respiratoire utilisés en chantier de désamiantage. Note scientifique et technique – NS376.
- INRS. 2023. Extraction base de données SCOLA. Rapport d'activité pour la période du 1<sup>er</sup> juillet 2012 au 31 décembre 2022. Mesures d'exposition à l'amiante META réalisées dans le cadre du décret 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante.
- Inserm. 1999. Effets sur la santé des fibres de substitution à l'amiante (expertise collective). Rapport établi à la demande de la Direction Générale de la Santé et de la Direction des Relations du Travail (Ministère de l'Emploi et de la solidarité). 429 pp. Paris, France.
- Khalliulin TO, Kisin ER, Guppi S, Yanamala N, Zhernovkov V, Shvedova AA. 2020. Differential responses of murine alveolar macrophages to elongate mineral particles of asbestiform and non-asbestiform varieties: Cytotoxicity, cytokine secretion and transcriptional changes. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 409: 115302.
- Kodavanti UP, Andrews D, Schladweiler MC, Gavett SH, Dodd DE, Cyphert JM. 2014. Early and delayed effects of naturally occurring asbestos on serum biomarkers of inflammation and metabolism. *J. Toxicol. Environ. Health A* 77, 1024-1039.
- Korchevskiy, AA, Wylie AG. 2021. Dimensional determinants for the carcinogenic potency of elongate amphibole particles. *Inhal Toxicol* 33 (6-8): 244-259.
- Korchevsky AA, Wylie AG. 2022. Dimensional characteristics of the major types of amphibole mineral particles and the implications for carcinogenic risk assessment. *Inhalation Toxicology*, 34:1-2, 24-38
- LAFP. 2023. Etude des expositions professionnelles, environnementales aux fibres d'amiante en liaison avec les procédures d'entretien de dalles de sol vinyle amiante et avec la granulométrie des fibres émises. DAVINYLAIR –N°EST-2016/1/235. Rapport Final. 36 p.
- Lahondère D., Cagnard F., Wille G., Duron J., Hertout A. (2021) – L'amiante dans l'environnement naturel : Éléments de compréhension et d'aide à l'identification et à la caractérisation. Rapport final, BRGM/RP-70343-FR, 142 p.
- Lambert, C. S., B. H. Alexander, G. Ramachandran, R. F. MacLehose, H. H. Nelson, A. D. Ryan et J. H. Mandel. 2016. A case-control study of mesothelioma in Minnesota iron ore (taconite) miners. *Occup Environ Med* 73 (2): 103-9.
- Leinradi R, Petriglieri JR, Pochet A, Yakoub Y, Lelong M, Lescoat A, Turci F, Lecureur V, Huaux F. 2023. Distinct Pro-Inflammatory Mechanisms Elicited by Short and Long Amosite Asbestos Fibers in Macrophages. *Int. J. Mol. Sci.* 2023, 24, 15145.
- Lieberman-Cribbon W, Taioli E. 2023. Epidemiologic roadblocks in studying elongated mineral particles and mesothelioma risk. *Environ. Res.* 230: 115086.
- Loomis, D, Dement JM, Richardson D, Wolf S. 2010. Asbestos fibre dimensions and lung cancer mortality among workers exposed to chrysotile. *Occup Environ Med* 67 (9): 580-4.
- Loomis, D, Dement JM, Elliott L, Richardson D, Kuempel ED, Stayner L. 2012. Increased lung cancer mortality among chrysotile asbestos textile workers is more strongly associated with exposure to long thin fibres. *Occup Environ Med* 69 (8): 564-8.

- Merouane S. A new automatic analysis tool for the determination of primary particle size from electron microscopy images: Application of the Cellpose software, *Journal of Aerosol Science*, vol. 178,106349.
- Meyer-Plath A, Bäger D, Dziurawitz N, Perseke D, Simonow BK, Thim C, Wenzlaff D, Plitzko S. 2020. A Practicable Measurement Strategy for Compliance Checking Number Concentrations of Airborne Nano- and Microscale Fibers. *Atmosphere* 11 (11): 1254.
- MSHA. 2005. Asbestos exposure limit; proposed rule. *Fed Reg.* July 29:43950–43989 Dateaccessed: June 30, 2008.
- Nel A. 2023. Carbon nanotube pathogenicity conforms to a unified theory for mesothelioma causation by elongate materials and fibers. *Environmental Research* 230: 114580.
- OMS. 1998. Détermination de la concentration des fibres en suspension dans l'air. Méthode recommandée: la microscopie optique en contraste de phase (comptage sur membrane filtrante),64 pp. Genève, Suisse.
- Perlman D, Mandel JH, Odo N, Ryan A, Lambert C, MacLehose RF, Ramachandran G, Alexander BH. 2018. Pleural abnormalities and exposure to elongate mineral particles in Minnesota iron ore (taconite)workers. *Am J Ind Med* 61 (5): 391-399.
- Pietruska JR, Johnston T, Zhitkovich A, Kane AB. 2010. XRCC1 deficiency sensitizes human lung epithelial cells to genotoxicity by crocidolite asbestos and Libby amphibole. *Environ. Health Perspect.* 118, 1707-1713.
- Poland CA, Byrne F, Cho W-S, Prina-Mello A, Murphy FA, Davies GL, Coey JMD, Gounko Y, Duffin R, Volkov Y, Donaldson K. 2012. Length dependant pathogenic effects of nickel nanowires in the lung and the peritoneal cavity. *Nanotoxicology* 6 : 899-911.
- Qi Y-T, Zhang F-L, Tian S-Y, Wu H-Q, Zhao Y, Zhang X-W, Liu Y-L, Fu P, Amatore C, Huang W-H. 2024. ROS/RNS Leakage During Frustrated Phagocytosis of Glass Nanofibers Characterized by Nanosensor and its Implications on Lung Injury. *Nature Nanotechnology* 19: 524-533.
- Rabiee A, Della Ventura G, Mirzapour F, Malinconico S, Bellagamba S, Lucci F, Paglietti F. 2023. « Deep learning for asbestos counting ». *Journal of Hazardous Materials* 455: 131590.
- Reid A, Heyworth J, de Klerk NH, Musk B. 2008. Cancer incidence among women and girls environmentally and occupationally exposed to blue asbestos at Wittenoom, Western Australia. *Int J Cancer* 122 (10): 2337-44.
- Reid, A., Merler E, Peters S, Jayasinghe N, Bressan V, Franklin P, Brims F, de Klerk NH, Musk AW. 2018. Migration and work in postwar Australia: mortality profile comparisons between Australian and Italian workers exposed to blue asbestos at Wittenoom. *Occup Environ Med* 75 (1): 29-36.
- Rice C, Heineman EF. 2003. An asbestos job exposure matrix to characterize fiber type, length, and relative exposure intensity. *Appl Occup Environ Hyg.* 18(7):506-12.
- Schinwald A, Murphy FA, Prina-Mello A, Poland CA, Byrne F, Movia D, Glass JR, Dickerson JC, Schultz DA, Jeffree CE, Macnee W, Donaldson K. 2012a. The threshold length for fibre-induced acute pleural inflammation. *Toxicol Sci* 128; 461-70
- Schinwald A, Donaldson K. 2012b. Use of back-scatter electron signals to visualise cell/nanowires interactions in vitro and in vivo; frustrated phagocytosis of long fibres in macrophages and compartmentalisation in mesothelial cells in vitro. *Part Fibre Toxicol* 9 : 34

- Schinwald A, Chernova T, Donaldson K. 2012c. Use of silver nanowires to determine thresholds for fibre length-dependant pulmonary inflammation and inhibition of macrophage migration in vitro. *Part Fibre Toxicol* 9 : 47.
- Scognamiglio V, Di Giuseppe D, Lassinantti Gualtieri M, Tomassetti L, Gualtieri AF. 2021. A systematic study of the cryogenic milling of chrysotile asbestos. *Applied Sciences* 11, 4826.
- Shea BJ, Reeves BC, Wells G, Thuku M, Hamel C, Moran J, Moher D, Tugwell P, Welch V, Kristjansson E, Henry DA. 2017. AMSTAR2: a critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both. *BMJ* 358: j4008.
- Silva RM, Xu J, Saiki C, Anderson DS, Franzi LM, Vulpe CD, Gilbert B, Van Winkle LS, Pinkerton KE. 2014. Short (2µm) versus long (20µm) silver nanowires : a comparison of in vivo pulmonary effects post instillation. *Part Fibre Toxicol* 11:52.
- Smith SR. 2023. An updated review of diffuse mesothelioma of the pleura – A sentinel health event of potential elongate mineral particle pathogenicity. *Environ. Res.* 239: 115608.
- Stettler LE, Sharpnack D, Krieg EF. 2008. Chronic Inhalation of Short Asbestos: Lung Fiber Burdens and Histopathology for Monkeys Maintained for 11.5 Years after Exposure. *Inhalation Toxicology.* 20: 63-73.
- Sturm R. 2010. Theoretical approach to the hit probability of lung-cancer-sensitive epithelial cells by mineral fibers with various aspect ratios. *Thoracic Cancer* ISSN 1759-7706.
- TNO. 2017. Onderzoek beschermingsfactoren bij adembeschermingsmiddelen gebruikt in de asbestbranche” traduit depuis le néerlandais (“Étude des facteurs de protection des équipements de protection respiratoire utilisés dans le secteur de l'amiante”).
- Tomatis M, Turci F, Ceschino R, Riganti C, Gazzano E, Martra G, Ghigo D, Fubini B. 2010. High aspect ratio materials: role of surface chemistry vs. length in the historical “long and short amosite asbestos fibers”. *Inhalation Toxicology.* 22(12): 984–998.
- Turci F, Tomatis M, Compagnoni R, Fubini B. 2009. Role of associated mineral fibres in chrysotile asbestos health effects: the case of balangeroite. *Ann. Occup. Hyg.* 53, 491-497.
- Vorster T, Mthombeni J, teWaterNaude J, Phillips JI. 2022. The Association between the Histological Subtypes of Mesothelioma and Asbestos Exposure Characteristics. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 19(21): 14520.
- Wang F, Wang Y, Yao X, Ma C, Yin Y, Song M. 2019. Length and diameter-dependant phagocytosis and cytotoxicity of long (100µm) silver nanowires in macrophages. *Chemosphere* 237: 124565.
- Wylie AG, Korchevsky AA. 2023. Dimensions of elongate mineral particles and cancer: A review. *Environmental Research* 230, 114688.

## 10.2 Normes

- AFNOR. 2003. NF X 50-110 *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise*. AFNOR (indice de classement X 50-110).
- Norme Iso 22262-1. 2012. *Qualité de l'air. Matériaux solides. Partie 1: Échantillonnage et dosage qualitatif de l'amiante dans les matériaux solides d'origine commerciale*.

NF X43-269. 2017. Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META - Comptage par MOCP.

NF X43-050. 2021. Qualité de l'air — Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission — Méthode indirecte.

NF ISO 13794. 2020. Air ambiant — Dosage des fibres d'amiante — Méthode par microscopie électronique à transmission par transfert indirect.

NF ISO 10312. 2020. Air ambiant — Dosage des fibres d'amiante — Méthode par microscopie électronique à transmission par transfert direct.

NF EN ISO 16000-7. 2007. Air intérieur - Partie 7 : stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air.

Fascicule de documentation FD X46-033. 2023. Stratégie d'échantillonnage pour la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air.

### 10.3 Législation et réglementation

Arrêté du 19 août 2011 relatif aux modalités de réalisation des mesures d'empoussièremment dans les immeubles bâtis.

Arrêté du 14 août 2012 relatif aux conditions de mesurage des niveaux d'empoussièremment, aux conditions de contrôle du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle aux fibres d'amiante et aux conditions d'accréditation des organismes procédant à ces mesurages.

Arrêté du 25 juillet 2022 fixant les conditions de certification des entreprises réalisant des travaux de retrait ou d'encapsulage d'amiante, de matériaux, d'équipements ou d'articles en contenant et les conditions d'accréditation des organismes certificateurs.

Arrêté du 1<sup>er</sup> octobre 2019 relatif aux modalités de réalisation des analyses de matériaux et produits susceptibles de contenir de l'amiante, aux conditions de compétences du personnel et d'accréditation des organismes procédant à ces analyses.

---

# ANNEXES

---

## Annexe 1 : Lettre de saisine



**MINISTÈRE  
DU TRAVAIL,  
DU PLEIN EMPLOI  
ET DE L'INSERTION**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

2022-SA-0223

Paris, le 23 NOV. 2022  
novembre 2022

Sous-direction des conditions de travail,  
de la santé et de la sécurité au travail  
Bureau des risques chimiques, physiques,  
biologiques et maladies professionnelles

Le Directeur général du travail

à

Affaire suivie par : Nathalie GABERT/Thomas COLIN  
Tél. : 01 44 38 26 70 / 01 44 38 26 67  
Mél. : [nathalie.gabert@travail.gouv.fr](mailto:nathalie.gabert@travail.gouv.fr) ; [thomas.colin@travail.gouv.fr](mailto:thomas.colin@travail.gouv.fr)

Monsieur le directeur général de l'agence nationale de  
sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement  
et du travail (ANSES)

**Objet** : Saisine relative au sujet des fibres courtes d'amiante en milieu professionnel

**PJ** : Note de la direction générale du travail (DGT) du 9 juillet 2018 sur le sujet des particules minérales allongées d'intérêt (PMAI)

En date du 6 mars 2018, la direction générale de la santé (DGS) a saisi votre agence d'une demande d'évaluer l'opportunité d'une mise à jour de l'évaluation des risques sanitaires (ERS) au regard des nouvelles données toxicologiques, météorologiques et épidémiologiques disponibles sur le sujet des fibres courtes d'amiante (FCA). Cette demande devait accompagner les mesures de prévention à adopter au vu des résultats issus des études commanditées suite à votre avis de février 2009, ce aux fins d'évaluer les empoussièrtements en fibres d'amiante générés lors de certaines situations de travail et tout particulièrement lors du nettoyage de dalles de sol en vinyle-amiante.

En réponse, votre rapport du 1<sup>er</sup> août 2022 a conclu, comme en 2009, à l'impossibilité de conduire cette ERS faute de disposer d'études ou de données individualisant les effets de ces FCA, que ce soit chez l'homme ou chez l'animal. Cependant, ce rapport formule dans le même temps plusieurs recommandations nouvelles, par comparaison avec les positions prises dans votre rapport de février 2009, s'agissant tout particulièrement de l'évaluation et de la prévention des risques liés aux FCA en milieu professionnel.

L'importance de ces recommandations et l'incidence qu'elles sont susceptibles d'avoir sur la réglementation encadrant les travaux exposant à l'amiante et la nécessité d'en préciser plusieurs aspects techniques nous conduisent à saisir votre agence d'une nouvelle demande d'expertise sur ce sujet des FCA, afin de mieux appréhender les suites pouvant être données aux recommandations susmentionnées.

À titre préliminaire, j'attire votre attention sur le fait que cette saisine porte exclusivement sur les fibres courtes relevant du champ réglementaire de l'amiante et non sur toutes les PMAI présentant des caractéristiques dimensionnelles similaires aux dites FCA. Effectivement, si nous gardons à l'esprit les conclusions de votre rapport de 2017 ainsi que les recommandations associées, nous restons pour l'heure, en l'attente des résultats de l'étude portant sur les PMAI pilotée depuis le 15 juin 2018 par l'organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBTB), sur le positionnement formalisé dans la note DGT du 9 juillet 2018. Celle-ci rappelle ainsi que le champ d'application de la réglementation amiante du code du travail reste actuellement circonscrit aux seules 6 catégories de silicates fibreux listées tant dans la réglementation nationale que dans la législation européenne.

1

En premier lieu, au-delà des travaux réalisés dans le cadre du rapport que vous nous avez rendu le 1<sup>er</sup> août dernier, nous vous demandons de nous apporter des éclaircissements, via une analyse bibliométrique de la littérature existante, sur le niveau de dangerosité des FCA en environnement professionnel, de façon à pouvoir connaître la gravité du risque pour les travailleurs s'y trouvant exposés. A défaut de pouvoir conclure à ce sujet au vu des données existantes, nous souhaiterions que vous puissiez nous détailler les méthodes permettant d'évaluer précisément la dangerosité pour les travailleurs d'une exposition à cette catégorie de fibres d'amiante.

Cette première étape est incontournable, dès lors que l'ensemble de la réglementation relative à la santé et à la sécurité au travail, incluant celle relative à la prévention du risque amiante, fixe des prescriptions qui dépendent nécessairement de la nature et de la gravité du risque professionnel auquel se trouvent effectivement exposés les travailleurs.

Pour cette raison, les conclusions issues de vos travaux sur ce premier aspect de notre saisine conditionneront nécessairement l'ampleur des éléments devant nous être communiqués sur les autres demandes détaillées dans cette saisine.

En deuxième lieu, en l'absence à ce jour de cadrage existant en la matière et dans un souci d'homogénéisation des pratiques des laboratoires, nous souhaiterions connaître les préconisations techniques relatives au mesurage de ces fibres (en termes de stratégie d'échantillonnage, de modalités de prélèvements comme d'analyse des filtres), que ce soit :

- Pour les mesurages portant sur la réalisation de processus ou de phases opérationnelles émettant pareilles FCA ;
- Pour les mesurages environnementaux effectués durant la réalisation de travaux exposant aux FCA par application des dispositions des articles R. 4412-124 et R. 4412-128 du code du travail (ces données étant effectivement nécessaires pour procéder au calcul incombant aux employeurs et leur permettant de contrôler le respect de la valeur limite d'exposition professionnelle – VLEP- en matière d'amiante).

En troisième lieu, afin d'orienter un éventuel travail réglementaire sur ce sujet, nous souhaiterions pouvoir disposer de données sur le niveau d'émissivité des FCA et, pour ce faire, notamment obtenir les listes les plus complètes possibles :

- Des catégories d'objets géologiques ainsi que des familles de matériaux et produits manufacturés susceptibles de comporter un nombre important de FCA ;
- Des types de techniques et modes opératoires susceptibles de favoriser, lorsque mis en œuvre, une émission de FCA, si possible en identifiant les techniques et modes opératoires les plus émissifs de FCA ;
- Des moyens de protection collective (MPC) de processus (au sens de l'article R. 4412-109 du code du travail) susceptibles d'abaisser efficacement la concentration en FCA au poste de travail de l'opérateur mettant en œuvre le processus considéré.

Ces listes devront permettre de recouvrir les différentes situations de travail pouvant conduire, en pratique, à l'exposition des travailleurs aux FCA.

Enfin, dès lors que votre rapport du 1<sup>er</sup> août 2022 recommande de redéfinir les niveaux réglementaires d'empoussièrement actuellement fixés à l'article R. 4412-88 du code du travail « du fait de la présence de FCA dans les appareils de protection respiratoires lors d'interventions sur des MPCA », et eu égard à leur importance (puisqu'il graduant le niveau des protections collectives et individuelles devant être choisies par les employeurs lors de la mise en œuvre de leurs processus), nous souhaiterions disposer d'indications précises quant à la façon de pouvoir prendre en considération cette catégorie de fibres d'amiante en vue de la redéfinition ultérieure de ces bornes réglementaires.

Ces indications devront nous être données à la lumière des études déjà publiées, à l'instar de la synthèse de la campagne menée par l'INRS pour la détermination des facteurs de protection assignés (FPA) des appareils de protection respiratoire (APR) utilisés en chantier de désamiantage, mais également en prenant en considération les résultats d'études actuellement en cours de réalisation, que ce soit les chantiers complémentaires à l'étude précitée et destinés à permettre d'affiner le FPA des appareils à adduction d'air, ou les études supervisées pour notre compte par l'institut de radioprotection et de sécurité nucléaires (IRSN) en vue de la détermination d'un FPA pour les tenues étanches ventilées (TEV) et les hautes ventilés (HV) lorsqu'utilisés pour des travaux exposant à l'amiante. Elles devront également intégrer une éventuelle variation de la VLEP actuelle (10 f/L sur 8 heures), dès lors que cette dernière devrait intégrer le décompte des FCA.

A la lumière des recommandations techniques et scientifiques que vous pourrez nous apporter sur ces diverses demandes, tout particulièrement sur la première pour laquelle les réponses apportées conditionnent nécessairement l'ampleur des travaux devant être réalisés par votre agence sur nos autres sollicitations, mes services s'attacheront, dans le cadre de leurs prérogatives, à déterminer les suites réglementaires devant, le cas échéant, être données sur ce sujet au dispositif actuellement codifié aux articles R. 4412-94 à R. 4412-148 du code du travail.

Je vous remercie de m'indiquer, dans les meilleurs délais, les modalités de réponses que votre agence envisage apporter à ces demandes. Dans l'attente, mes services se tiennent à votre disposition pour toute question complémentaire.

Le Directeur général du Travail

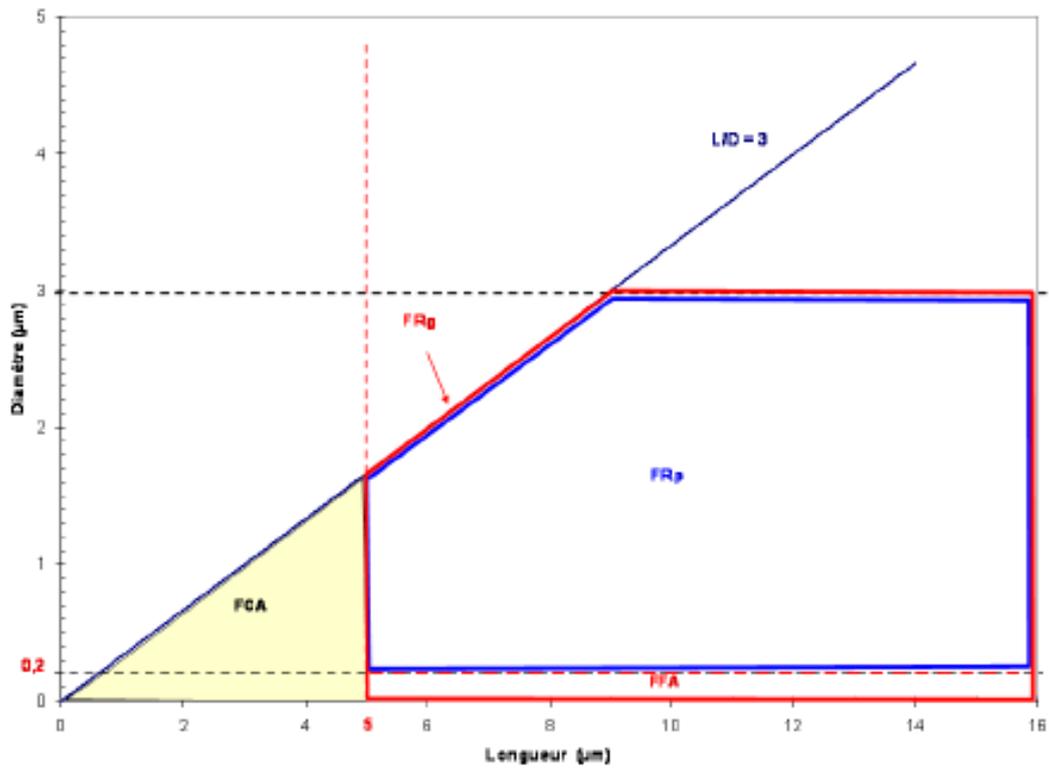


Pierre RAMAIN

## Annexe 2 : Suivi des actualisations du rapport

Date	Page	Description de la modification
26/04/24		Première version du rapport

### Annexe 3 : Représentation des types de fibres d'amiante selon leurs caractéristiques dimensionnelles (d'après Anses, 2009).



## Annexe 4 : Consultations d'organismes : réponses transmises

### BAuA (méthode d'analyse, cahier des charges)

La réponse du BAuA à l'Anses est que ce projet ne sera pas abouti d'ici la fin des travaux du groupe de travail et donc aucune information ne peut être communiquée à ce sujet. Dans tous les cas, uniquement les fibres longues réglementaires sont prises en compte. Par ailleurs, sur les questions d'amas, leur évaluation est jugée complexe et subjective. Plusieurs situations peuvent être retrouvées : soit il est possible de caractériser les fibres constituant l'amas individuellement, soit cela n'est pas possible et dans ce cas l'amas est traité comme un seul objet puis classé selon le rapport d'allongement jugé faible/élevé en considérant les diamètres de Féret minimum et maximum.

### CSTB (méthode d'analyse, cahier des charges ; prélèvement ; MPC, efficacité de filtration)

La réponse du CSTB à l'Anses concernant la mesure des FCA est que la méthode *in situ* n'est pas encore suffisamment éprouvée et n'est dans tous les cas pas développée à cet effet. Elle ne sera pas en mesure de différencier les fibres courtes et longues donc pas adaptée pour les FCA. Par ailleurs, le CSTB n'est pas un laboratoire d'analyse accrédité pour l'amiante et a travaillé uniquement sur des fibres OMS et son expertise concerne les particules et fibres en général mais non spécifiques à l'amiante. Concernant les prélèvements, il est estimé que la méthodologie actuelle capte bien les FCA, tout aussi bien voire mieux. Quand les tailles d'objet diminuent, l'efficacité des filtres est améliorée avec un maximum pour des diamètres aérodynamiques aux alentours de 200/300 nm. Il existe des études sur les fibres en général et notamment des lois d'équivalence entre les dimensions d'une fibre et celles d'une particule. Concernant les moyens de protection collective (MPC), ce qui existe pour les fibres longues d'amiante devrait donc être applicable. Pour ce qui est des documents historiques sur les techniques de production d'amiante (i.e. avis/cahier techniques du CSTB), le CSTB juge qu'il est peu probable que cela apporte des informations pertinentes.

### HSE (méthode d'analyse, cahier des charges ; émissivité)

Le HSE a répondu qu'ils ne disposaient d'aucune information sur les questions d'amas ou des matériaux émissifs en FCA. Sur les fibres considérées, ils prennent en compte les fibres avec un rapport d'allongement  $L/D > 3$ . Dans certains cas, il leur arrive de dénombrer l'ensemble des fibres  $L > 0,5 \mu\text{m}$  mais pas systématiquement. Pour les échantillons pulmonaires, ils comptent généralement  $L > 1 \mu\text{m}$ . Ils pourraient potentiellement faire de nouvelles analyses, considérant cette fois-ci l'ensemble des fibres ( $L > 0,5 \mu\text{m}$ ), mais ne sont pas certains que cela serait suffisamment pertinent pour tirer des conclusions.

### IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

L'IRSN a répondu que l'institut supervise à la demande de la DGT des études en vue de la détermination de facteurs de protection assignés (FPA) pour les tenues étanches ventilées (TEV) et les heaumes ventilés (HV) lorsqu'utilisés pour des travaux exposant à l'amiante. Ce sujet n'est pas encore finalisé. Aucune date prévisionnelle de fin de travaux n'a été indiquée.

Annexe 5 : Tableau de synthèse des études épidémiologiques analysées par l'Anses en 2022 (Anses 2022)

Référence	Secteur	Type d'amiante	Type d'étude
Loomis <i>et al.</i> 2010	Travailleurs – Usine textile-amiante	Chrysotile	Cohorte – Mortalité (toutes causes, cancer poumon)
Loomis <i>et al.</i> 2012	Travailleurs – Usine textile-amiante	Chrysotile	Cohorte – Mortalité (toutes causes, cancer poumon)
Hamra <i>et al.</i> 2014	Travailleurs – Usine textile-amiante	Chrysotile	Cas témoins nichée dans cohorte – cancer du poumon
Hamra <i>et al.</i> 2017	Travailleurs – Usine textile-amiante	Chrysotile	Cas-témoins nichée dans cohorte – cancer du poumon
Allen <i>et al.</i> 2014	Travailleurs – Mines de Taconite	PMA d'amphiboles	Cohorte - Mortalité
Allen <i>et al.</i> 2015b	Travailleurs – Mines de Taconite	PMA amphiboles	Cohorte - Incidence cancers
Allen <i>et al.</i> 2015a	Travailleurs – Mines de Taconite	PMA amphiboles	Cas témoins – cancer du poumon
Lambert <i>et al.</i> 2016	Travailleurs – Mines de Taconite	PMA amphiboles	Cas témoins - mésothéliome
Perlman <i>et al.</i> 2018	Travailleurs – Mines de Taconite	PMA amphiboles	Etude transversale – maladies respiratoires
Reid <i>et al.</i> 2008	Travailleurs – Mines de crocidolite <i>Résidents à proximité des mines</i>	Crocidolite	Cohorte – incidence cancers
Reid <i>et al.</i> 2018	Travailleurs – Mines de crocidolite	Crocidolite	Cohorte - Mortalité
Korchevskiy et Wylie (2021)	Sept cohortes de travailleurs	PMA amphiboles	Modélisation de la relation entre le développement du mésothéliome et du cancer du poumon et des fractions de PMA d'amphiboles en fonction de leurs caractéristiques dimensionnelles

1 **Annexe 6 : Tableau de synthèse des études expérimentales (*in vivo* et *in vitro*) analysées par l'Anses en 2022**  
 2 **(Anses 2022)**

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
<i>In vivo</i>						
Cyphert <i>et al.</i> (2012a)	Tremolite (ED) Ferroactinolite (ON)  ----- Chrysotile (SM)  Amphi. Libby (LA)	98% (21%)* 97% (32%)  ----- 86% (64%)  68% (30%)	Intra-trachéale (rat)	1 expo	1 jour 3 mois  -----	Inflammation aiguë; diminution à 3 mois (LBA) (ED, ON) Fibrose légère à 3 mois, score 1,0 dose forte (ON)  ----- Fibrose modérée (3 mois, score dose-dépendant 1,6-3,0) (SM) Fibrose minimale ou légère (3 mois, score dose-dépendant 1,0-1,4) (LA)
Cyphert <i>et al.</i> (2012b)	Amosite Amphi. Libby (LA)	60% 89%	Intra-trachéale (rat)	1 expo/1 dose (0,65 mg/rat) 1 expo/2 doses (0,65 et 6,5 mg/rat)	12 et 24 mois	12 mois : fibrose minimale (LA high), Faible (Am) 24 mois : fibrose minimale (LA low), faible (LA high), modérée (Am) Surexpression sign. des gènes codant des collagènes à 24 mois (LA/0,65 mg/rat). Augm. Sign. Expression Msln (LA/0,65 mg/rat), Wt1, Egr (LA/6,5 mg/rat et amosite)
Kodavanti <i>et al.</i> (2014)	Tremolite (ED) Ferroactinolite (ON) Chrysotile (SM) Amphi. Libby (LA)	98% (21%)* 97% (32%)* 86% (64%)* 68% (30%)*	Intra-trachéale (rat)	1 expo	1 jour ; 3 et 15 mois	Dosages sériques ; Effets précoces plus marqués protéines phase aiguë (A2M, AGP) pour SM et LA que pour ED et ON ; Niveaux statistiquement modifiés

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
	----- Amosite Amphi. Libby (LA)	----- 68%	----- Inhalation (rat)	----- 6 h/j, 5 j/sem 13 sem	----- 1 jour ; 1, 3, 18 mois	à 15 mois : ED, SM, ON augmentation A2M, AGP, ostéopontine ; IL-6 diminuée ED SM ON Pas de modification leptine, adiponectine ----- Pas de modification
Cyphert <i>et al.</i> (2015)	Amosite Amphi. Libby (LA)	84% 68%		1 expo ou expo répétée sur 13 semaines. Plusieurs doses : 0,15 ; 0,50 ; 1,5 ; 5,0 mg/rat	Jusqu'à 20 mois	Tumeurs multidoses : 20 mois (LA) : 1 meso diaphragme (dose 0,15) ; 1 meso plèvre (dose 5.0) – Pas de tumeur AM. L1 & Am fibrose faible ( $\leq 2$ )  Tumeurs single dose 20 mois (LA) : 1 meso (dose 5.0) – Am : 1 CA (dose 0,15), 1 AD dose 5.0) Fibrose fibrose faible ( $\leq 2$ Am) ; nulle à modérée (<1-2,3 LA)
Cyphert <i>et al.</i> (2016)	Tremolite (ED) Ferroactinolite (ON) Chrysotile (SM) Amphi. Libby (LA)	98% (21%)* 97% (32%)* 86% (64%)* 68% (30%)*	Intra-trachéale (rat)	1 expo (2 doses : 0,50 et 1,5 mg)	1 semaine  ----- 15 mois	Altération persistante de la fonction respiratoire avec SM ----- Toxicité pulmonaire avec chrysotile (enzymes LBA). Granulomes (ED et SM), moins avec LA. Fibrose interstitielle SM  LA : Dose 0,5mg : 1/24 carcinome bronchiolo-alvéolaire (CBA) (LA métastaté au péricarde, au diaphragme et au thymus) et 1/21 CBA (ED)

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
Stettler <i>et al.</i> (2008)	Chrysotile	65%	Inhalation (singe)	18 mois	11,5 ans (singe)	Absence de lésion pulmonaire
Bernstein <i>et al.</i> (2008)	Chrysotile	65% (35% WHO/total F)*	Inhalation (rat)	6h/jour ; 5 jours	0 et 3 jours	Absence d'effet pathologique
Bernstein <i>et al.</i> (2011)	Amosite	46,3% (53,8% WHO/total F)*	Inhalation (rat)	6h/jour, 5 jours	Jusqu'à 363 jours	Fibrose pulmonaire grade 4
Bernstein <i>et al.</i> (2014, 2015)	Crocidolite	64,8% (35,2% WHO/total F)*	Inhalation (rat)	6h/jour, 5 jours	Jq 91 jours et jq 362 jours	Fibrose pulmonaire grade 4
Bernstein <i>et al.</i> (2018)	Chrysotile (dose max) ----- --- Crocidolite (dose max)	73% (27% WHO/total F)*  ----- 63,8% (36,2% WHO/total F)*	Inhalation (rat)	6h/jour ; 1 jour, 14 et 28 jours	0 jour (durant expo 1, 14, 28 jours) et 14, 28 jours (post-expo de 28 jours)	Poumon: inflammation légère, hyperplasie, inflammation/fibrose ≤ grade 3 ----- Réponse inflammatoire et fibrose pulmonaire de grade 4
Bernstein <i>et al.</i> (2021)	Chrysotile (dose max) ----- - Crocidolite  ----- -- Amosite	76,3% 1103,8/1447,1  ----- 69% 373,4/539,4  ----- 60% 632,3/1052,8	Inhalation (rat)	6h/jour ; 5 jours/semaine, 13 semaines	Jq 24,4 mois	Poumon : Inflammation/fibrose jusqu'à grade 4 majoritairement grade 1 à 3 ----- Réponse inflammatoire et fibrose pulmonaire de grade 4 ----- Réponse inflammatoire et fibrose pulmonaire de grade 4
<b><i>In vitro</i></b>						

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
Duncan <i>et al.</i> (2010)	Fraction respirable ≤ 2,5 µm long Amosite Amphi. Libby (LA)	60% 89%	In vitro (CEPH)	2h, 24h	0h	Inflammation. Expression gènes réponse au stress, prolifération, amosite > LA Inflammation équivalente amosite et LA par rapport à masse ; non expliquée par différences de surface, production d'oxydants ou nombre de particules
Pietruska <i>et al.</i> (2010)	Crocidolite Amphi. Libby (LA)	91% 51%	In vitro (CEPH)	24, 48, 72 h	0h	Génotoxicité (micronoyaux) sur CEPH invalidées sur <i>XRCC1</i> (réparation dommages oxydatifs à ADN) Cr et LA, clastogènes; LA, aneugène
Tomatis <i>et al.</i> (2010)	Amosite « long » (LFA) Amosite « court » (SFA)	70% ≈ 99%	In vitro (CEPH)	24h	0h	Analyses physico-chimiques des fibres Production de NO (CEPH). LFA le plus actif. Les échantillons différent par d'autres paramètres que les dimensions état de coordination de Fe
Duncan <i>et al.</i> (2014)	Amosite (UICC) Amosite (RTI) Amphi. Libby (LA 2000) Amphi. Libby (LA 2007)	85,4% 25,6% 70,9% 78%	In vitro (CEPH)	2h 24h	0h	Caractéristiques des fibres (AS, Fe, production OH•) Production de IL-8 par les cellules RTI le plus actif (masse). Relation avec longueur et AS.
Turci <i>et al.</i> (2012)	Chrysotile Balangero micro (CTL-BM) Chrysotile Val Malenco micro (CTL-VM) CTL-BM nano** CTL-VM nano**	50% 75% 98% 100%	Objectif : préparation échantillons	24h (acellulaire et CEPH)	0h	Réactivité (acellulaire) : réduction avec réduction de la taille. CEPH : cytotoxicité (LDH), production de NO, génération EADO/N, peroxydation des lipides, production de NO Activité micro > nano (sign stat). Nanos ≈ contrôles

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
Khaliulin <i>et al.</i> (2020)	Tremolite asbestiform (ASB) Riebeckite (ASB) Tremolite (FDC) Riebeckite (FDC)	58% 61% 50% 50%	In vitro (cellules souris type macrophage)	24h	0h	Cytotoxicité (LDH) ; altération ADN (cassures) ; sécrétion de cytokines : expression génique (RNAseq) Effet cytotoxique ASB > FC (masse) ; équivalent (base AS et NB) Dérégulation gènes : riebeckite ASB = riebeckite FC mais riebeckite ASB > rebeckite FC Profil tremolite # profil riebeckite Clustering des particules sur la base AS et NB
Sturm <i>et al.</i> (2010)	Fibres théoriques avec AR = 3 et 100	Non déterminé	Modélisation du dépôt des fibres dans le poumon	Non applicable	Non applicable	Le risque le plus élevé d'atteinte des cellules épithéliales cibles du poumon : fibres de diamètre $\geq 1\mu\text{m}$ . AR = rôle secondaire ; longueur = rôle moindre dans le transport et le dépôt de (mais rôle dans l'interaction particules-tissus)
Cook <i>et al.</i> (2016) <sup>17</sup>	Trente-six échantillons de fibres d'amiante (dont 6 lixiviés), 1 de fibre synthétique et 13 échantillons non fibreux (grunérite, alumine, dawsonite, carbure	Grande variété selon les échantillons  Etude rétrospective en vue de la mise au point d'un modèle dose-réponse prédictif du potentiel des	Acellulaire avec échantillons des expérimentations animales (dissolution des fibres et analyse des caractéristiques* : dimensions, SA)	Non applicable	Non applicable	Un meilleur modèle prédictif est obtenu avec l'emploi des données des échantillons lixiviés par dissolution acide <i>in vitro</i> à court terme.  $\Sigma\text{SA}$ : meilleur prédicteur du potentiel pour le mésothéliome que $\Sigma\text{EP}$ .

<sup>17</sup> Des précisions ont été apportées à la description de l'étude de Cook *et al.* 2016 depuis l'expertise de 2022.

Référence	Fibres ou PMAi	% fibres courtes/PMAi courtes	Exposition (espèce)	Durée exposition	Durée post-expo	Résultats
	de silicium) utilisés dans des travaux publiés par différents auteurs. Cook <i>et al.</i> ont ajouté de nouvelles données issues de leurs travaux non publiés sur les caractéristiques physico-chimiques des fibres de certains échantillons qu'ils ont lixiviés et sur la rétention pleurale et pulmonaire des fibres après cinq mois post-injection intra-pleurale.	fibres à générer un mésothéliome	----- Injection intra-pleurale (Rats)	----- Analyse des fibres dans les échantillons plèvre, poumon des expérimentations	----- 5,5 mois post intra-pleural	Les ajustements de dose en excluant les EPs avec AR < 8 et L > 80 µm améliorent la prédictibilité du modèle par rapport au modèle avec ΣSA non ajustée.  Les auteurs concluent que l'analyse montre que le poids des fibres courtes ne doit pas être ignoré puisque le meilleur prédicteur prend en compte toutes les EP, dont les fibres courtes.

- 1 \* Pourcentage de particules définies comme des fibres par rapport au nombre total de particules (fibres et non fibres). Kodavanti *et al.* 2014  
2 \*\* Traitement par ultrasons pendant 3h. Le traitement ne modifie pas la minéralogie, ni la composition chimique.  
3 Au moins 100F/ml > 20 µm de longueur  
4 A2M : α-2 macroglobulin  
5 AGP : α-1 acid glycoprotéi  
6 AR : aspect ratio  
7 AS : aire de surface  
8 ASB : Asbestiforme  
9 CEPH : cellules épithéliales pulmonaires humaines  
10 EADO/N : espèces actives dérivées de l'oxygène/de l'azote

- 1 EGFR : epidermal growth factor receptor (récepteur du facteur de croissance épidermique)
- 2 EP (elongated particle, SEP nombre de EP)
- 3 FDC : fragments de clivage
- 4 Msln : Mesothelin gene (gène codant pour la mésothéline)
- 5 NB : Nombre de particules
- 6 SA: surface area (aire de la surface)
- 7 WT1 : Wilms'tumor gene

## Annexe 7 : Liste des références éligibles sur le volet « effets sanitaires » et motifs d'inclusion et d'exclusion

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion / exclusion	Commentaire
Bandli et Mc Namee (2023)	Mineralogical and dimensional characterization of EMPs destined for biological experimentation	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'éléments sur les FCA
Korchevsky et Wylie (2023)	Toxicological and epidemiological approaches to carcinogenic potency modeling for mixed mineral fiber exposure: the case of fibrous talc and chrysotile	Exclue	Cette étude n'apporte aucune information spécifique sur la cancérogénicité des FCA, même si les fibres de longueur $\leq 5 \mu\text{m}$ sont majoritaires dans l'échantillon étudié.
Huh <i>et al.</i> (2022)	Disease Latency according to Asbestos Exposure Characteristics among Malignant Mesothelioma and Asbestos-Related Lung Cancer Cases in South Korea	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'éléments sur les FCA
Vorster <i>et al.</i> (2022)	The Association between the Histological Subtypes of Mesothelioma and Asbestos Exposure Characteristics	Exclue	Série de cas chronologique avec numération des fibres selon leur longueur sur pièce d'autopsie de mésothéliome. Cette étude n'apporte pas d'élément sur la pathogénicité des FCA.
Bernstein (2022)	The health effects of short fiber chrysotile and amphibole asbestos	Inclue	Revue de la littérature

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion / exclusion	Commentaire
Wylie et Korchevsky (2023)	Dimensions of elongate mineral particles and cancer: A review	Inclue	Etude de modélisation du développement du mésothéliome et du cancer du poumon dans des cohortes de travailleurs exposés
Korchevsky et Wylie (2022)	Dimensional characteristics of the major types of amphibole mineral particles and the implications for carcinogenic risk assessment	Inclue	Etude de modélisation du développement du mésothéliome et du cancer du poumon dans des cohortes de travailleurs exposés
Nel (2023)	Carbon nanotube pathogenicity conforms to a unified theory for mesothelioma causation by elongate materials and fibers	Inclue	Etude sur le rôle de la longueur des nanotubes de carbone sur la toxicité
Bruno <i>et al.</i> (2023)	Size characteristics of asbestiform fibers in lung tissue of animals that grazed in areas rich in ophiolitic outcrops in Central Calabria (Southern Italy)	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'éléments sur la pathogénicité des FCA
Smith (2023)	An updated review of diffuse mesothelioma of the pleura – A sentinel health event of potential elongate mineral particle pathogenicity	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'éléments sur les FCA
Goodman <i>et al.</i> (2023)	Non-asbestiform elongate mineral particles and	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'éléments sur les FCA

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion / exclusion	Commentaire
	mesothelioma risk: Human and experimental evidence		
Lieberman-Cribbon et Taioli, 2023	Epidemiologic roadblocks in studying elongated mineral particles and mesothelioma risk	Exclue	Cette étude n'apporte pas d'élément sur les FCA
Leinardi <i>et al.</i> (2023)	Distinct Pro- Inflammatory Mechanisms Elicited by Short and Long Amosite Asbestos Fibers in Macrophages	Inclue	Etude in vitro sur les fibres courtes et longues d'amosite
Gualtieri <i>et al.</i> (2023)	In vitro toxicity of short vs long chrysotile	Inclue	Etude in vitro et approche théorique via le calcul d'indice de toxicité potentielle pour les fibres courtes et longues de chrysotile
Qi <i>et al.</i> 2024	ROS/RNS Leakage During Frustrated Phagocytosis of Glass Nanofibers Characterized by Nanosensor and its Implications on Lung Injury	Exclue	Les échantillons de particules « courtes » ont une longueur moyenne de 10 µm. Cette étude n'apporte pas d'information sur les FCA.
Poland <i>et al.</i> 2012	Length dependant pathogenic effects of nickel nanowires in the lung and the peritoneal cavity	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la toxicité des nano-fils de nickel
Schinwald <i>et al.</i> 2012a	The threshold lenght for fibre-induced acute pleural inflammation	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la toxicité des nano-fils de nickel

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion / exclusion	Commentaire
Schinwald <i>et al.</i> 2012b	Use of back-scatter electron signals to visualise cell/nanowires interactions in vitro and in vivo; frustrated phagocytosis of long fibres in macrophages and compartmentalisation in mesothelial cells in vitro	Inclue	Etude de la phagocytose frustrée avec des nano-fils.
Schinwald <i>et al.</i> 2012 c	Use of silver nanowires to determine thresholds for fibre length-dependant pulmonary inflammation and inhibition of macrophage migration in vitro	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la toxicité des nano-fils d'argent
Wang <i>et al.</i> 2019	Legth and diameter-dependant phagocytosis and cytotoxicity of long (100µm) silver nanowires in macrophages	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la toxicité des nano-fils d'argent
Chung <i>et al.</i> 2017	Inactivation, clearance, and functional effects of lung-instilled short (1.5 µm) and long (10 µm) silver nanowires in rats	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la toxicité des nano-fils d'argent
Silva <i>et al.</i> 2014	Short (2µm) versus long (20µm) silver nanowires : a comparaison of in	Inclue	Etude de l'impact de la longueur dans la

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion exclusion	/ Commentaire
	vivo pulmonary effects post instillation		toxicité des nano-fils d'argent

**Annexe 8 : Grille d'évaluation de la revue de Bernstein (2022)**

<b>AMSTAR 2 ITEMS</b>	<b>Bernstein (2022)</b>
1. Les questions de recherche et les critères d'inclusion pour la revue incluaient-ils les composants des PECOTS ?	Non
2. La revue contient-elle une déclaration explicite selon laquelle les méthodes de revue ont été établies avant la conduite de celle-ci et la revue justifie-t-elle tout écart important par rapport au protocole ?	Non
3. Les auteurs de la revue expliquent-ils leur choix des modèles d'études à inclure dans la revue ?	Sans objet
4. Les auteurs de la revue ont-ils utilisé une stratégie de recherche documentaire exhaustive ?	Non
5. Les auteurs de la revue ont-ils sélectionné les études en double ?	Non
6. Les auteurs de la revue ont-ils effectué l'extraction des données en double ?	Non
7. Les auteurs de la revue ont-ils fourni une liste des études exclues et justifié les exclusions ?	Non
8. Les auteurs de la revue ont-ils décrit les études incluses de manière suffisamment détaillée ?	Non
9. Les auteurs de la revue ont-ils utilisé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais (RdB) dans les études individuelles qui ont été incluses dans la revue ?	Non
10. Les auteurs de la revue ont-ils rendu compte des sources de financement des études incluses dans l'examen ?	Non
11. Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs de la revue ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour la combinaison statistique des résultats ?	Sans objet
12. Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs de la revue ont-ils évalué l'impact potentiel du RdB dans les études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'autres synthèses de preuves ?	Sans objet
13. Les auteurs de la revue ont-ils tenu compte du RdB dans les études individuelles lorsqu'ils ont interprété/discuté les résultats de la revue ?	Sans objet
14. Les auteurs de la revue ont-ils fourni une explication satisfaisante et une discussion sur l'hétérogénéité observée dans les résultats de la revue ?	Sans objet
15. S'ils ont effectué une synthèse quantitative, les auteurs de la revue ont-ils mené une enquête adéquate sur le biais de publication	Sans objet

(biais des petites études) et discuté de son impact probable sur les résultats de la revue ?	
16. Les auteurs de la revue ont-ils signalé des sources potentielles de conflit d'intérêts, y compris le financement qu'ils ont reçu pour la réalisation de la revue ?	Oui

## Annexe 9 : Liste des références éligibles sur le volet « présence et émissivité des FCA depuis les matériaux » et motifs d'exclusion

Auteurs (année)	Titre de l'étude	Inclusion / exclusion	Commentaire
Obmiński (2022a)	The concentration of asbestos fibres during buildings exploitation analysis of concentration variability	Exclue	Ne concerne pas les FCA
Obmiński (2022b)	Asbestos cement products and their impact on soil contamination in relation to various sources of anthropogenic and natural asbestos pollution	Exclue	Ne concerne pas les FCA
Van Orden (2023)	Discriminant analysis of amphiboles: Additional consideration	Exclue	Utilisation de fonctions discriminantes afin de différencier pour les amphiboles le caractère asbestiforme ou non. Ne concerne que les fibres de $L > 5 \mu\text{m}$
Sahmel et al. 2022	Evaluation of Airborne Asbestos Concentrations Associated with the Operation and Maintenance of Brakes and Clutches on Nonautomated Heavy Equipment	Exclue	Ne concerne pas les FCA
Wylie et al. 2022	Discriminant analysis of asbestiform and	Exclue	Publication qui utilise des modèles statistiques pour

	non-asbestiform amphibole particles and its implications for toxicological studies		déterminer le caractère asbestiforme ou non asbestiforme d'une particule minérale allongée en fonction de son diamètre et de sa longueur
Gardner et al. (2022)	Pathogenic Potential of Respirable Spodumene Cleavage Fragments following Application of Regulatory Counting Criteria for Asbestiform Fibres	Exclue	Ne concerne pas les FCA
Chatfield (2023)	Asbestiform fibers and cleavage Fragments: Conceptual approaches for differentiation in laboratory practice and data analysis.	Exclue	Ne concerne pas les FCA

## Annexe 10 : Base de données Scola pour les fibres d'amiante réglementaires – données matériaux - sous-sections 3 et 4 (d'après INRS 2023)

Matériau	SS3			SS4		
	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)
Toiture - Bardage : plaque plane ou ondulée, tuile, ardoise	78697	53	169	2973	56	97
Revêtement de sol : dalle, lé, ...	38373	62	139	2616	62	128
Mortier - Colle de carrelage	34546	54	153	1168	52	110
Colle bitumineuse	26053	55	131	991	58	65
Joint d'installation domestique ou industrielle - Élément de friction et éléments électriques	20670	64	183	2696	65	35
Revêtement intérieur / Faux plafond : plaque fibro ciment	20387	59	256	835	57	305
Canalisation / Gaine en amiante ciment extérieur / Gaine d'activités Génie Civil	20080	50	150	1567	57	425
Bitume / Brai de Houille / Mastic d'étanchéité amianté	20042	48	282	1643	57	66
Canalisation / Gaine en amiante ciment intérieur / Gaine d'activités bâtementaires	17281	51	254	835	58	176
Enduit épais (ou ciment) - Peinture de revêtement épais intérieur / extérieur	11354	50	569	2387	47	193
Enduit de lissage ou de débullage	10459	45	511	1654	57	40
Revêtement intérieur / Faux plafond : carton amianté, panneau sandwich	9147	52	337	534	49	134
Résidu amianté issu de bâtiment sinistré (tornade - incendie) et de site pollué	8669	54	69	1610	74	27
Peinture amiantée	8598	56	798	1547	53	52
Calorifugeage	7732	53	524	461	66	196
<b>Matériaux contaminés par un matériau amianté</b>	6499	52	308	2073	73	48
Ragréage - Chape maigre	5399	53	173	211	66	7
Tresse joint de dilatation ou pied de cloison	5176	56	206	391	65	8
Revêtement routier	5071	64	13	524	75	27
Flocage	4120	39	3410	289	52	1315
Plâtre amianté	4093	41	1481	823	49	71
Porte ou clapet coupe-feu / Porte palière d'ascenseur / Autre élément solide équivalent	3383	55	427	397	59	50
<b>Matériels et équipements contaminés</b>	2613	61	147	2767	84	43
Conduits métalliques revêtus - Revêtement sur support métallique (peinture, enduit)	2356	58	411	238	50	308
Terre et roche amiantifère naturelle	1095	70	60	867	74	60

*En gras les 10 matériaux avec le plus grand nombre de mesures par sous-section*

Matériau	SS3			SS4		
	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)
<i>Concentration moyenne pondérée calculée sur les mesures avec amiante détectée et nombre de mesures (couple matériaux-technique) &gt; 10</i>						
<i>En vert : concentration moyenne pondérée correspondant au niveau 1 d'empoussièrement</i>						
<i>En orange : concentration moyenne pondérée correspondant au niveau 2 d'empoussièrement</i>						

## Annexe 11 : Base de données Scola pour les fibres d'amiante réglementaires – données technique - sous-sections 3 et 4 (d'après INRS 2022)

Technique	SS3			SS4		
	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)
Dépose par le dessous - Désemboitage - Déconstruction	72068	67	152	3328	77	100
Cassage manuel - Burinage - Piquage - Démolition avec un outil manuel	54949	59	284	2062	58	180
Nettoyage - Ramassage - Manutention - Conditionnement	51219	63	286	7532	69	103
Dépose par le dessus - Désemboitage - Déconstruction	48029	31	633	1592	6	47
Ponçage	37086	54	291	561	53	117
Raclage	24620	56	394	977	61	810
Découpage pneumatique - Tronçonnage - Perçage - Sciage - Découpage Thermique	16530	54	259	4273	54	159
Découpage avec outil manuel	13541	54	294	1215	52	117
Grignotage / cassage mécanisé - Concassage - Démolition avec un engin mécanisé / déporté	13338	44	238	311	59	34
Rabotage - Rectification - Fraisage	10277	49	125	185	62	30
Brossage - Grattage manuel	9242	56	893	1169	54	251
Arrachage	7806	54	254	426	68	151
Talutage - Terrassement - Pelletage mécanisé - Bennage	5348	59	18	603	77	15
Désemboitage - Dépose	3924	100	nc	116	100	nc
Préparation de la zone - Isolement / Confinement / Déconfinement de la zone	3544	77	136	767	74	17
Grenailage - Hydrogommage - Sablage	1934	49	3522	79	75	nc
Chemisage - Doublage - Encoffrement - Recouvrement - Rebouchage	1879	65	70	1919	58	20
Pelletage manuel	1864	63	113	82	70	nc
Vissage - Tirage de câble - Réglage	1595	62	106	1325	61	38
Brossage - Grattage mécanisé	1516	55	1002	120	66	4
Technique THP / UHP - Technique par cryogénie	1188	34	4131	123	69	569
Carottage - Forage	875	64	105	1024	59	30

Technique	SS3			SS4		
	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)	N mesures total	% mesures amiante ND	Concentration fibres (moy. pondérée, F/L)
Décapage - Lustrage	855	53	2432	187	60	13
Fixation par revêtement - Imprégnation	849	57	633	328	63	98
Prélèvement de matériau	841	72	95	688	74	14
Décollage électrique / induction	696	65	227	39	59	nc
Procédé chimique	622	56	45	273	81	151
<b>Prélèvement atmosphérique</b>	<b>504</b>	<b>95</b>	<b>nc</b>	<b>1565</b>	94	20
Balayage	193	64	5	80	79	nc
Decollage thermique	149	42	16	29	38	nc
Démolition par explosion ou par vérinage	69	72	208	5	80	nc
<p><i>En gras les 10 techniques avec le plus grand nombre de mesures par sous-section</i></p> <p><i>Concentration moyenne pondérée calculée sur les mesures avec amiante détectée et nombre de mesures (couple matériaux-technique) &gt; 10</i></p> <p><i>nc : non calculé</i></p> <p><i>En vert : concentration moyenne pondérée correspondant au niveau 1 d'empoussièrement</i></p> <p><i>En orange : concentration moyenne pondérée correspondant au niveau 2 d'empoussièrement</i></p>						

## Notes

---



# anses

**CONNAÎTRE, ÉVALUER, PROTÉGER**

AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE  
de l'alimentation, de l'environnement et du travail

14 rue Pierre et Marie Curie 94701 Maisons-Alfort Cedex  
[www.anses.fr](http://www.anses.fr) — [@Anses\\_fr](https://twitter.com/Anses_fr)