

Les fibres minérales artificielles siliceuses

Laines minérales
Filaments continus de verre

Évaluation de l'exposition de la population générale
et des travailleurs

- **Avis de l'Afsset**
- **Rapport d'expertise collective**
- **Annexes**

))) **afsset** .)))

agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Octobre 2008



Le Directeur général par intérim

Maisons-Alfort, le 13 octobre 2008

AVIS

de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

Relatif aux « fibres minérales artificielles : laines minérales et filaments continus de verre

Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs »

Saisine Afsset n° « 2004/012 »

L'Afsset a pour mission de contribuer à assurer la sécurité sanitaire dans le domaine de l'environnement et du travail et d'évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter. Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque.

Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 20 juillet 2004 par ses tutelles ministérielles, en l'occurrence la Direction Générale de la Santé, la Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale et la Direction des Relations au Travail, afin de procéder à une évaluation de l'exposition actuelle et passée de la population générale et professionnelle aux fibres minérales artificielles siliceuses (FMA). Les principaux objectifs se déclinent en deux axes :

- préciser les applications passées et actuelles relatives à ces fibres, notamment l'historique de leur emploi, leur accessibilité, le devenir après usage, les caractéristiques techniques et l'évolution des matériaux fibreux avec le vieillissement de l'ouvrage. L'étude doit également recenser les additifs présents dans ces fibres, les évolutions techniques et l'existence de produits ou procédés de substitution non dangereux ou moins dangereux en indiquant la fréquence d'utilisation de ces alternatives ;
- évaluer l'exposition de la population générale et professionnelle.

Un précédent rapport¹ publié en avril 2007 a traité prioritairement des fibres céramiques réfractaires (FCR) et des fibres de verre à usage spécial de type E et 475 Glass. Le présent

¹ Afsset. (2007) : Les fibres minérales artificielles siliceuses: les fibres céramiques réfractaires et les fibres de verre à usage spécial, évaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs.

rapport s'intéresse aux autres représentants des FMA : les laines minérales et les filaments continus de verre.

Contexte

L'Afsset a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) «Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté le groupe de travail «fibres minérales artificielles» pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

La partie technique relative à l'utilisation et aux applications passées et actuelles des laines minérales et des filaments continus de verre a été instruite par l'Agence. L'Afsset a auditionné certains industriels concernés, contacté des organismes publics susceptibles de détenir des informations, mandaté des cabinets spécialisés pour faire des études et réalisé une large revue de la littérature.

Le groupe de travail a animé et orienté les travaux réalisés par l'Afsset. Il a apporté un regard critique sur l'expertise technique produite. Par ailleurs, il a synthétisé les éléments actuellement disponibles en matière d'évaluation de l'exposition de la population générale et professionnelle à ces fibres, en s'appuyant sur les données publiées dans la littérature scientifique et dans un certain nombre de bases de données.

L'Afsset s'appuyant sur l'avis de son Comité d'Experts Spécialisés « Evaluation des risques liés aux milieux aériens », consulté en raison de la dispersion éventuelle des fibres dans le milieu aérien rend l'avis suivant :

Considérant les objectifs de l'action 18 du PNSE visant à « limiter l'exposition de la population générales aux fibres minérales artificielles »

Considérant l'avis du CSHPF en date du 5 février 2004 relatif à la protection de la population contre les risques pour la santé de l'exposition au FMA siliceuses ;

Considérant la mise en place d'un plan d'actions interministériel, en date du 2 avril 2004, piloté par le ministère de la santé et des solidarités et déclinant les recommandations de l'avis du CSHPF ;

Le présent avis porte explicitement sur les laines minérales et les filaments de verre continus. Les travaux et conclusions du groupe de travail, assemblés dans un document intitulé: « **Rapport d'expertise collective relatif aux laines minérales et aux filaments continus de verre** », ont été adoptés lors de la séance plénière du CES « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » du 9 juillet 2008.

L'Afsset relève que

Pour les caractéristiques et la traçabilité des produits :

Les laines minérales sont des matériaux d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie comprenant les laines de verre, les laines de roche et les laines de laitier. Elles se composent principalement de silice (40 à 70 %), d'alumine et de divers oxydes. Au début des années 1990, leur composition chimique a été modifiée afin d'accroître la solubilité des fibres dans les milieux biologiques, satisfaisant ainsi aux critères d'exonération de classement cancérigène² de la directive européenne 97/69/CE.

Depuis les deux dernières décennies, la tendance est à une diminution continue du diamètre des fibres produites par les industriels. A l'heure actuelle, les chiffres disponibles établissent ce diamètre moyen entre 3 et 8 µm.

En règle générale, les laines minérales contiennent, outre des fibres, 3 à 5% de liants organiques (résines formo-phénoliques) qui assurent la cohésion du produit et moins de 1% d'huile qui limite l'émission de poussière et l'absorption de l'eau. Suite à une réaction chimique et thermique, le liant devient solide et libère une quantité résiduelle de formaldéhyde (recherché pour son activité biocide) susceptible d'émaner du produit lors de la pose ou de l'utilisation. Une étude réalisée à la demande de l'Afsset, montre que 8 produits courants d'isolation testés (4 neufs et 4 anciens), ont des émissions en composés organiques volatils (COV) respectant les seuils fixés par le protocole Afsset 2006³, à l'exception du formaldéhyde. Les émissions de formaldéhyde, principal composé dégagé, peuvent perdurer, même plusieurs années après la pose, comme le montrent des essais réalisés sur les produits anciens.

Pour certaines applications telles que les fours électroménagers, les producteurs européens proposent des solutions sans liant organique. Les laines de laitier ne contiennent pas de liant.

En France, le marché de l'isolation thermique est en forte augmentation depuis 20 ans et les laines minérales représentent 60 à 70 % des matériaux utilisés dans le bâtiment. Les laines minérales répondent favorablement aux exigences réglementaires, en termes d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie. Leurs usages sont largement répandus dans le bâtiment, l'aéronautique, la construction navale, etc.

Le bâtiment représente 90 % des usages qui concernent l'isolation des toits, des murs, des planchers et l'étanchéité dans le secteur des bâtiments résidentiels et non résidentiels. La technique d'isolation des toitures utilisant la laine soufflée en flocons est de plus en plus utilisée, alors que cette technique est *a priori* la plus émissive en termes de fibres.

Le calorifugeage des tuyauteries ou des équipements thermiques industriels représente 5 % des quantités de laine minérale utilisée.

² Note Q de la directive EU 97/69/CE

La classification comme cancérigène ne doit pas s'appliquer s'il peut être établi que la substance remplit l'une des conditions suivantes :

- Un essai de biopersistance à court terme par inhalation a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 µm ont une demi-vie pondérée inférieure à 10 jours.
- ou un essai de biopersistance à court terme par instillation intratrachéale a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 µm ont une demi-vie pondérée inférieure à 40 jours.
- Ou un essai intrapéritonéal approprié n'a montré aucune évidence d'excès de cancérigénicité
- Ou un essai à long terme par inhalation approprié a conduit à une absence d'effets pathogènes significatifs ou de modification néoplasiques

Note R

La classification comme cancérigène ne doit pas s'appliquer aux fibres dont le diamètre moyen géométrique pondéré par la longueur moins deux erreurs types est supérieur à 6 µm

³ Procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de composés organiques volatils et de critères sanitaires. Octobre 2006. Disponible sur www.afsset.fr.

Les autres usages, concernant un grand nombre d'applications et de produits, représentent les 5 % restants (projection ou flocage notamment pour la protection incendie des bâtiments en mélange avec des additifs (plâtres, ciment...), appareils électroménagers, ...). La France est le plus important utilisateur européen de la technique par projection.

Concernant l'identification et la traçabilité, il n'existe pas de code ou de marquages spécifiques inscrits sur la laine minérale (aucune réglementation ne l'exige). Toutefois, les producteurs ont rédigé des fiches de données de sécurité.

Le vieillissement correspond à toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement. Les données disponibles restent actuellement limitées. Une étude réalisée à la demande de l'Afsset suggère que les matériaux vieillissent émettent davantage de fibres au moment de leur retrait que lors de l'installation de produits neufs.

Les déchets de chantiers sont admis en décharge pour déchets non dangereux (Centre d'Enfouissement Technique de classe 2).

Les filaments de verre continus, dont le diamètre nominal se situe le plus souvent entre 6 et 15 μm , sont des fibres de verre d'une longueur suffisante pour être compatible avec une utilisation sous forme de textiles. Il existe une grande diversité d'utilisation de ces fibres, leur principale finalité (environ 90% de leur usage) étant de servir de renfort dans les matériaux composites. Les secteurs utilisant ces matériaux sont par ordre décroissant de tonnage utilisé : le bâtiment et les infrastructures; les moyens de transport; l'électricité et l'électronique; etc. Les déchets issus des filaments de verre continus sont considérés comme des déchets industriels banals.

Pour la métrologie des fibres

En milieu professionnel, la mesure des FMA s'effectue réglementairement par microscopie optique à contraste de phase, MOCP. Cette technique est adaptée aux situations où la nature des fibres n'est pas à rechercher.

Pour la mesure des expositions environnementales, la microscopie optique à lumière polarisée (MOLP) et la microscopie électronique à balayage analytique (MEBA) sont les méthodes les plus adaptées. Les fibres mesurées dans l'air des bâtiments peuvent être de nature différente. La MOCP n'est pas utilisée en milieu environnemental puisqu'elle ne permet pas d'identifier la nature des fibres mesurées.

Les niveaux de FMA dans l'air mesurés dans les bâtiments par les techniques MOLP et MEBA diffèrent d'un à deux ordres de grandeur. Dans les essais où les niveaux d'émission de laines minérales sont faibles, la MEBA, utilisée à un fort grossissement, n'a pas la sensibilité suffisante pour détecter de telles concentrations.

Pour l'exposition de la population

Exposition des travailleurs

Les données, issues des bases COLCHIC et Evalutil, témoignent de la large utilisation des laines minérales dans un grand nombre de secteurs d'activité.

Des éléments issus de la base COLCHIC attestent d'une diminution des niveaux d'exposition au cours du temps.

Pour les laines minérales, les niveaux d'exposition montrent que, sur l'ensemble des deux bases de données, le taux de dépassement de la VME⁴ (valeur moyenne d'exposition) fixée

⁴ Circulaire DRT n°95-4 du 12 janvier 1995 modifiant et complétant la circulaire du 19 juillet 1982 modifiée / Circulaire DRT n°8 du 21 août 1996 modifiant et complétant la circulaire du 19 juillet 1982 modifiée. Pour rappel, la VME se définit comme une valeur admise pour la moyenne dans le temps des concentrations

à 1 f/ml (soit 10^6 f/m³) est de l'ordre de 10% (notamment lors d'opérations d'usinage, soufflage,...).

Par ailleurs, l'analyse des résultats de la base COLCHIC, pour différentes populations de fibres, met en évidence une augmentation au cours du temps de la proportion de fibres fines en suspension dans l'air. Cette situation est probablement liée à une modification des caractéristiques dimensionnelles des laines minérales dans les vingt dernières années.

Très peu de données ont pu être collectées pour les activités associées soit à un retrait de laines minérales usagées (arrachage, grattage...), soit à une intervention dans des locaux contenant ce type de matériaux. Cependant, les informations disponibles indiquent que ces activités sont plus exposantes pour le travailleur que la pose ou la production.

Pour les filaments continus de verre, les niveaux d'exposition professionnelle apparaissent moins importants et le taux de dépassement de la VME fixée à 1 f/ml reste également très faible. L'exposition peut être aussi associée à des particules allongées émises notamment lors de l'usinage de matériaux composites. Dans ce cas, elles proviennent soit de la résine, soit de la matrice.

Estimation de la prévalence d'exposition professionnelle

Les données disponibles sont parcellaires, particulièrement pour les filaments continus, et ne permettent de donner qu'un ordre de grandeur. L'exposition vie entière aux filaments continus concerne vraisemblablement moins de 1% des travailleurs. On peut estimer que la prévalence de l'exposition professionnelle vie entière aux laines minérales⁵ est de l'ordre de 10% chez les hommes, et de 1% chez les femmes. Une matrice emplois-expositions aux laines minérales est actuellement en cours de finalisation au Département santé travail de l'InVS et devrait fournir prochainement plus de précisions.

Exposition de la population générale aux laines minérales

Le nombre de données disponibles est limité. Les mesures effectuées dans l'environnement urbain parisien, en situation de fond, ne dépassaient pas la valeur de 2 f/m³ (en MOLP) pour les fibres de diamètre <3µm.

Lors d'une étude portant sur deux chantiers de retrait des laines minérales, les concentrations retrouvées à 30 m du chantier étaient 100 fois supérieures au fond de pollution.

Une analyse des données de plus de 200 prélèvements dans les bâtiments non résidentiels parisiens, suite à des plaintes, montre que dans la grande majorité des cas, les concentrations en fibres sont du même ordre de grandeur que le fond de pollution urbaine de l'agglomération parisienne.

auxquelles un travailleur est effectivement exposé au cours d'un poste de 8 heures. La valeur limite 8 heures est destinée à protéger les travailleurs des effets d'une exposition prolongée à des agents chimiques. Des modifications physiologiques réversibles sont parfois tolérées, aucune atteinte organique ou fonctionnelle de caractère irréversible ou prolongée n'est admise à ce niveau d'exposition pour la grande majorité des travailleurs.

⁵ Proportion de personnes exposées au moins une fois au cours de leur vie professionnelle aux laines minérales, quel que soit le niveau.

Au vu des constats précédents, l'Afsset recommande pour les laines minérales et les filaments de verre continus

De renforcer la connaissance des caractéristiques des produits et leur traçabilité

- Obtenir de la part des producteurs de laines minérales et de filaments de verre continus, via leurs représentants par exemple :
 - la distribution granulométrique des fibres dans leurs produits ;
 - la mise en place d'une traçabilité des caractéristiques physico-chimiques des fibres en raison de l'évolution de la composition des laines minérales ;
 - des données sur le vieillissement des laines minérales, en termes de modifications structurelles en condition normales ou de contraintes résultant de leur utilisation (températures élevées, contact avec des agents chimiques corrosifs...)

et les inciter à la mise en place d'une fiche de données de sécurité (FDS) pour les articles en vue d'améliorer l'information. En effet, les produits contenant des laines minérales tout comme ceux contenant des filaments de verre continus ne présentent pas d'obligation réglementaire de mise à disposition d'une FDS ;

- Améliorer la gestion des déchets de laines minérales notamment sur le volet de l'identification et du tri. Cette question du devenir de substances utilisées dans le bâtiment doit s'intégrer dans un système global de gestion des déchets dans le secteur des bâtiments et travaux publics.

De mieux caractériser l'exposition professionnelle et celle de la population générale à ces fibres

- Acquérir des données d'exposition pour les activités professionnelles susceptibles d'être source de niveaux importants d'exposition aux fibres de laines minérales :
 - Soufflage, projection ou flochage ;
 - Retrait ;
 - Démolition de bâtiments ou de structures isolées.
- Réaliser des campagnes de prélèvements de longues durées afin de préciser l'exposition sur la journée de travail et mieux caractériser les pics d'exposition ;
- Elaborer des méthodes de quantification pour déterminer le niveau de contamination d'un local (valeur guide de gestion, contamination surfacique, etc.).

De mettre en place des mesures de prévention

- Adopter des procédures visant à réduire l'émission de fibres et empêcher ainsi leur dispersion dans l'environnement en priorité pour les chantiers de retrait ;
- Veiller à ce que les émissions en COV par les produits neufs, des substances utilisées en tant que résines/liants et autres additifs soient les plus basses possibles à travers la mise en place d'un label d'émissivité prenant en compte notamment les concentrations en formaldéhyde. A ce titre, l'Afsset a proposé en 2006 une procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de COV et de critères sanitaires.

L'Afsset souhaite également que :

- Le potentiel toxique et les éventuels effets sanitaires des laines minérales et des filaments continus de verre ainsi que des différents produits de même application soient mieux caractérisés ;
- Une réflexion critique soit menée sur le choix alternatif des tests d'évaluation actuellement préconisés pour évaluer le potentiel toxique de ces fibres selon la directive européenne 97/69/CE. D'autres éléments que la mesure du diamètre ou de la biopersistance doivent être discutés (composition chimique, réactivité de surface...) ;
- Soient étudiées les situations pour lesquelles un repérage et une identification des laines minérales dans les bâtiments et les produits manufacturés pourraient être pertinents. Plus globalement, *a minima* pour les nouvelles constructions, l'élaboration d'une « carte d'identité du bâtiment » recensant l'ensemble des matériaux utilisés est jugée d'intérêt pour une meilleure traçabilité.

Maisons-Alfort, le 13 octobre 2008

Le Directeur Général p.i.



Henri POINSIGNON

Les fibres minérales artificielles siliceuses

Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs

Saisine n°« 2004/012 »

RAPPORT d'expertise collective relatif

AUX LAINES MINÉRALES et AUX FILAMENTS CONTINUS DE VERRE

« Comité d'experts spécialisés des risques liés aux milieux aériens »

« Groupe de travail fibres minérales artificielles »

Juillet 2008

Mots clés

Fibre minérale artificielle, Laine minérale, laine de roche, Laine de verre, Laine de laitier, Filament continu de verre, Composites, Exposition professionnelle, Métrologie, Effet santé

Rapport : 9 juillet 2008

Présentation des intervenants

GRUPE DE TRAVAIL « FIBRES MINERALES ARTIFICIELLES »

Président

Mme Marie-Claude JAURAND – Directeur de recherche Inserm en biologie cellulaire et moléculaire – recherche sur les mécanismes d'action des fibres minérales artificielles

Membres

Mme Danièle LUCE – Epidémiologiste au département Santé Travail de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) et directeur de recherche Inserm / Unité 687 – épidémiologie des risques professionnels

Mme Isabelle STÜCKER – Directeur de recherche Inserm / Unité 754 – épidémiologie des cancers broncho-pulmonaires

M. Jacques AMEILLE – PU-PH de médecine du travail, Université Versailles-Saint Quentin en Yvelines/ chef de l'Unité de pathologie professionnelle, de santé au travail et d'insertion, hôpital Raymond Poincaré, Garches – participation à des travaux de recherche épidémiologiques sur les effets sur la santé des FMA

M. Patrick BROCHARD – PU-PH en médecine du travail au CHU Bordeaux, directeur du Laboratoire Santé Travail Environnement (LSTE, EA 3672) – coordonnateur du programme EVALUTIL

M. Christian COCHET – Responsable de la division Santé, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) – métrologie des fibres en lien avec les produits de construction

M. Stéphane DUCAMP – Technicien hygiéniste industriel au Département Santé Travail de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) – évaluation des expositions professionnelles à l'amiante et aux FMA, construction de matrices emplois-expositions

M. Edmond KAUFFER – Responsable du laboratoire d'analyses inorganiques et de caractérisation des aérosols à l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) – métrologie des fibres

M. Laurent MARTINON – Ingénieur hygiéniste au Laboratoire d'Etudes des Particules Inhalées (LEPI) – Ville de Paris

M. Jean-Claude PAIRON – PU-PH en médecine et santé du travail, Université Paris 12 – Créteil

M. Christophe PARIS – PU-PH Université Henri Poincaré, Nancy, Inserm ERI-11 – évaluation des risques professionnels, vice-président du CES « Evaluations des risques liés aux milieux aériens »

M. Raymond VINCENT – Responsable du laboratoire de caractérisation du risque chimique à l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) – bases de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques

ADOPTION DU RAPPORT PAR LE COMITE D'EXPERTS SPÉCIALISÉS : EVALUATION DES RISQUES LIÉS AUX MILIEUX AÉRIENS

Ce rapport a fait l'objet d'un point d'information au CES « Air » – le 5 décembre 2007

■ **Il a été adopté par le CES « AIR »** – le 9 juillet 2008

Président

M Christian ELICHEGARAY – Chef du département air/ Ademe - Surveillance de la pollution atmosphérique, Physico-chimie atmosphérique

Membres

M. René ALARY – Retraité – Pollution atmosphérique ; métrologie des polluants de l'air

Mme Isabella ANNESI-MAESANO – Responsable d'équipe épidémiologie des réponses immunitaire et inflammatoire/ EPAR - INSERM U707 – Epidémiologie respiratoire

M. Olivier BLANCHARD - Ingénieur d'étude/ Ineris - Pollution atmosphérique, évaluation quantitative des risques sanitaires

M. Pierre-André CABANES - Adjoint au directeur du service des études médicales/ EDF-GDF Services des études médicales - Evaluation quantitative des risques sanitaires

M. Dave CAMPAGNA - Responsable de la cellule d'épidémiologie/ RATP- Epidémiologie

Mme Véronique DELMAS – Directrice/ Air Normand- Surveillance de la pollution atmosphérique, chimie atmosphérique

Mme Véronique EZRATTY - Médecin évaluateur des risques sanitaires/ EDF-GDF Services des études médicales - Prévention des risques professionnels, Evaluation des risques sanitaires, Air intérieur

M. Robert GARNIER - Médecin toxicologue / CAP de Paris - Toxicologie, pathologies professionnelles

M. Philippe GLORENNEC - Enseignant chercheur/ ENSP - Epidémiologie, évaluation quantitative des risques sanitaires

Mme Séverine KIRCHNER - Responsable du pôle qualité de l'air intérieur/ CSTB - Chimie atmosphérique, Pollution de l'air intérieur

M. Maurice MILLET - Maître de conférence/ Université Louis Pasteur- CNRS Strasbourg - Physico-chimie des produits phytosanitaires dans l'air

M ; Alain MORCHEOINE - Directeur de l'air et des transports/ Ademe - Pollution atmosphérique, Emissions polluantes

M. Yannick MOREL - Responsable du département de détection biologique/ Centre d'études du Bouchet - Toxicologie moléculaire

M. Jean-Paul MORIN - Chargé de recherche/ Inserm –Métrologie et Toxicologie des aérosols complexes atmosphériques et de combustion. Dépollution automobile.

M. Christophe PARIS - Professeur des universités - praticien hospitalier/ CHU Nancy - Epidémiologie, pathologies professionnelles

M. Vincent-Henri PEUCH - chercheur chef de projet/ météo France - Modélisation atmosphérique

M. Charles POINSOT – Directeur/ Atmo Nord Pas de Calais - Pollution atmosphérique

Mme Martine RAMEL - Responsable du programme inter-unités du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air/ Ineris - Pollution atmosphérique, métrologie des polluants de l'air

M. Rémy SLAMA – Chercheur/ INSERM U. 823 – Epidémiologie

M. Fabien SQUINAZI – Directeur – Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris - Air intérieur, pathologies professionnelles induites par la QA, microbiologie

M ; Jacques VENDEL - Chef de laboratoire/ IRSN/DSU/SERAC - Aérosols (connaissances, métrologie

PARTICIPATION AFSSET

Coordination scientifique

Mme Mounia EL YAMANI – Chef de projet scientifique au département Expertises en Santé Environnement Travail – Afsset (coordination du groupe de travail, collecte de données et rédaction de la partie « filaments continus de verre »)

M. Guillaume BOULANGER – Chef de projet scientifique au département Expertises en Santé Environnement Travail – Afsset (collecte de données et rédaction de la partie « laines minérales »)

Secrétariat administratif

Mme Véronique QUESNEL – Afsset

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Agence Rhône Alpes pour la Maîtrise des Matériaux, le 9 mai 2007

Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique (APPA), le 13 mars 2007

European Owens Corning Fiberglas et St Gobain Vetrotex International, le 21 février 2006 et le 11 avril 2007

Fabricants d'Isolants en Laines Minérales Manufacturées (FILMM) et Syndicat Professionnel des Fabricants de Laine de Roche (SPLR), le 11 octobre 2005, le 11 septembre 2006 et le 17 septembre 2007

Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites (GPIC) le 25 mai 2007

Saint Gobain Isover, le 3 janvier 2008

Syndicat National de l'Isolation (SNI), le 26 juin 2007

Syndicat National des Plastiques Alvéolaires (SNPA), le 3 avril 2007

Visite de l'usine Isover d'Orange (production de laines de verre), le 24 novembre 2006

Visite du Centre de Recherche Industrielle Rantigny (CRIR, Saint Gobain Isover), le 30 novembre 2007

SOMMAIRE

| | |
|--|-----------|
| PRÉSENTATION DES INTERVENANTS | 3 |
| ABRÉVIATIONS | 16 |
| LISTE DES TABLEAUX | 19 |
| LISTE DES FIGURES | 21 |
| 1 CONTEXTE, OBJET ET MODALITÉS DE TRAITEMENT DE LA SAISINE | 25 |
| 1.1 CONTEXTE | 25 |
| 1.2 OBJET DE LA SAISINE | 26 |
| 1.3 MODALITÉS DE TRAITEMENT : MOYENS MIS EN ŒUVRE POUR INSTRUIRE LA SAISINE | 27 |
| 2 PRÉSENTATION DES FIBRES MINÉRALES ARTIFICIELLES | 28 |
| 2.1 DÉFINITION D'UNE FIBRE ET DES FMA | 28 |
| 2.2 TYPOLOGIE UTILISÉE POUR LES FMA | 30 |
| 2.3 COMPOSITION CHIMIQUE DES FMA | 31 |
| 2.4 PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES FMA | 33 |
| 3 LES LAINES MINÉRALES | 34 |
| 3.1 PRODUCTION ET UTILISATION | 34 |
| 3.1.1 <i>Définition des laines minérales</i> | 34 |
| 3.1.2 <i>Modes de fabrication des laines minérales</i> | 35 |
| 3.1.2.1 Laine de verre | 35 |
| 3.1.2.2 Laine de roche et laine de laitier | 37 |
| 3.1.3 <i>La composition des laines minérales</i> | 40 |
| 3.1.3.1 Laine de verre | 40 |
| 3.1.3.2 Laine de roche et laine de laitier | 41 |
| 3.1.4 <i>Propriétés physico-chimiques</i> | 43 |
| 3.1.5 <i>Le diamètre</i> | 44 |
| 3.1.6 <i>Les liants</i> | 50 |
| 3.1.7 <i>Les producteurs de laines minérales</i> | 57 |
| 3.1.7.1 La production mondiale | 57 |
| 3.1.7.2 La production européenne | 60 |
| 3.1.7.3 La production française | 61 |
| 3.1.7.4 Les importations et exportations françaises (cessions entre sites de production) | 62 |
| 3.1.7.5 Les ventes françaises | 64 |
| 3.1.8 <i>Les transformateurs et utilisateurs de laines minérales</i> | 68 |
| 3.1.8.1 Utilisation selon leur présentation | 68 |
| 3.1.8.2 Les acteurs | 69 |
| 3.1.8.3 Domaines d'applications | 72 |
| 3.1.8.3.1 Propriétés des laines minérales | 72 |
| 3.1.8.3.2 Applications | 73 |
| 3.1.8.3.3 Description pour les bâtiments résidentiels et tertiaires | 76 |
| 3.1.8.3.4 Description pour l'industrie | 82 |
| 3.1.8.3.5 Autres | 83 |
| 3.1.8.3.6 Répartition des applications | 84 |
| 3.2 CLASSIFICATION EUROPÉENNE DES LAINES MINÉRALES | 87 |
| 3.3 AUTRES PRODUITS UTILISÉS POUR LES MÊMES APPLICATIONS | 88 |
| 3.3.1 <i>Les plastiques alvéolaires</i> | 91 |
| 3.3.1.1 Le polystyrène expansé (PSE) | 91 |
| 3.3.1.2 Le polyuréthane (PUR) et Le polyisocyanurate (PIR) | 93 |
| 3.3.1.3 La mousse phénolique | 94 |
| 3.3.2 <i>Le verre cellulaire</i> | 95 |
| 3.3.3 <i>La perlite</i> | 95 |
| 3.3.4 <i>La vermiculite</i> | 95 |
| 3.3.5 <i>Les laines végétales de chanvre ou de lin</i> | 96 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.3.6 | <i>Le liège</i> | 96 |
| 3.3.7 | <i>Les produits minces réfléchissants</i> | 97 |
| 3.3.8 | <i>La wollastonite</i> | 98 |
| 3.3.9 | <i>La cellulose</i> | 98 |
| 3.3.10 | <i>Autres matériaux</i> | 99 |
| 3.4 | MARCHÉ DE L'ISOLATION | 103 |
| 3.4.1 | <i>Les chiffres du marché</i> | 103 |
| 3.4.2 | <i>Bâtiment résidentiel</i> | 107 |
| 3.4.2.1 | Isolation des toitures | 108 |
| 3.4.2.2 | Isolation des murs | 111 |
| 3.4.2.3 | Isolation des sols et des planchers | 113 |
| 3.4.3 | <i>Bâtiment non résidentiel</i> | 117 |
| 3.4.3.1 | Isolation de la toiture | 117 |
| 3.4.3.2 | Isolation des murs | 118 |
| 3.4.3.3 | Isolation industrielle | 119 |
| 3.5 | MAINTENANCE | 121 |
| 3.6 | ACCESSIBILITÉ ET MOYENS DE REPÉRAGE DE CES FIBRES | 121 |
| 3.6.1 | <i>Accessibilité</i> | 121 |
| 3.6.2 | <i>Les moyens de repérage et d'identification des laines minérales</i> | 122 |
| 3.7 | COMPORTEMENT DES PRODUITS EN SERVICE ET VIEILLISSEMENT | 123 |
| 3.8 | PRISE EN CHARGE ET TRAITEMENT DES DÉCHETS CONTENANT DES LAINES MINÉRALES | 126 |
| 3.8.1 | <i>Déchets des industriels producteurs de laines minérales</i> | 126 |
| 3.8.2 | <i>Déchets des utilisateurs de laines minérales</i> | 126 |
| 4 | LES FILAMENTS CONTINUS DE VERRE | 127 |
| 4.1 | COMPOSITION CHIMIQUE | 127 |
| 4.1.1 | <i>Verre E</i> | 127 |
| 4.1.2 | <i>Verres S et R</i> | 127 |
| 4.1.3 | <i>Verre C</i> | 128 |
| 4.1.4 | <i>Verre D</i> | 128 |
| 4.1.5 | <i>Verre AR</i> | 128 |
| 4.1.6 | <i>Verre ECR</i> | 128 |
| 4.2 | DIAMÈTRE DES FILAMENTS DE VERRE CONTINUS ET CLASSEMENT INTERNATIONAL | 130 |
| 4.3 | PROCESSUS DE FABRICATION | 131 |
| 4.3.1 | <i>La fusion</i> | 131 |
| 4.3.2 | <i>Fibrage</i> | 133 |
| 4.3.3 | <i>Étirage</i> | 133 |
| 4.3.4 | <i>La protection du fil</i> | 134 |
| 4.4 | COMPOSITION DE L'ENSIMAGE | 135 |
| 4.4.1 | <i>L'ensimage plastique</i> | 135 |
| 4.4.2 | <i>L'ensimage textile</i> | 136 |
| 4.5 | LES RENFORTS EN VERRE TEXTILE | 137 |
| 4.5.1 | <i>Désignation des fils de verre textile</i> | 137 |
| 4.5.2 | <i>Fils textiles</i> | 138 |
| 4.5.2.1 | Fils simples (ou fils silionne) | 138 |
| 4.5.2.2 | Fils retors | 138 |
| 4.5.2.3 | Fils câblés | 138 |
| 4.5.2.4 | Filés verranne | 139 |
| 4.5.3 | <i>Tissus et rubans tissés, silionne</i> | 139 |
| 4.5.4 | <i>Stratifils (ou rovings)</i> | 139 |
| 4.5.5 | <i>Stratifils bouclés (ou spun roving)</i> | 140 |
| 4.5.6 | <i>Tissus</i> | 140 |
| 4.5.6.1 | Tissus stratifils ou rovings | 140 |
| 4.5.6.2 | Tissus cousus, tricotés | 141 |
| 4.5.7 | <i>Mats</i> | 141 |
| 4.5.7.1 | Mats de fils coupés | 141 |
| 4.5.7.2 | Mats de fils continus | 142 |
| 4.5.7.3 | Mats de surface et Overlay | 142 |
| 4.5.7.4 | Fils (de base) coupés | 142 |
| 4.5.7.5 | Fibres broyées | 142 |
| 4.6 | PLACE DES FILAMENTS DE VERRE CONTINUS DANS LES MATÉRIAUX COMPOSITES | 145 |
| 4.6.1 | <i>Les résines (matrices)</i> | 147 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.6.1.1 | Les résines thermodurcissables | 148 |
| 4.6.1.1.1 | Polyesters insaturés | 148 |
| 4.6.1.1.2 | Vinylesters | 149 |
| 4.6.1.1.3 | Phénoliques | 149 |
| 4.6.1.1.4 | Epoxydes | 149 |
| 4.6.1.1.5 | Polyuréthanes et polyurées | 149 |
| 4.6.1.1.6 | Polyimides | 149 |
| 4.6.1.1.7 | Bismaléimides | 149 |
| 4.6.1.2 | Les résines thermoplastiques | 150 |
| 4.6.2 | <i>Les charges (additifs des résines)</i> | 150 |
| 4.6.2.1 | Les charges organiques | 151 |
| 4.6.2.2 | Les charges minérales | 151 |
| 4.6.2.2.1 | Craies et carbonates | 151 |
| 4.6.2.2.2 | Les silices | 151 |
| 4.6.2.2.3 | Les talcs | 152 |
| 4.6.2.2.4 | Les argiles et alumino-silicates | 152 |
| 4.6.2.3 | Les oxydes et hydrates métalliques | 152 |
| 4.6.2.3.1 | Poudres et microsphères | 152 |
| 4.6.2.3.2 | Alumine et trihydrate d'aluminium | 152 |
| 4.6.2.3.3 | Trioxyde d'antimoine | 153 |
| 4.6.2.3.4 | Oxyde de béryllium | 153 |
| 4.6.2.3.5 | Les céramiques | 153 |
| 4.6.2.4 | Le verre | 153 |
| 4.6.2.4.1 | Poudres de verre | 153 |
| 4.6.2.4.2 | Billes de verres creuses | 153 |
| 4.6.2.4.3 | Microsphères de verre | 153 |
| 4.6.2.5 | Le carbone | 153 |
| 4.6.3 | <i>Les procédés de mise en œuvre</i> | 154 |
| 4.6.4 | <i>Répartition des procédés de production et de transformation</i> | 155 |
| 4.6.4.1 | Présentation générale | 155 |
| 4.6.4.2 | La situation mondiale | 158 |
| 4.6.4.3 | La situation en France | 159 |
| 4.7 | LA PLACE DES FILAMENTS DE VERRE CONTINUS DANS LES TEXTILES TECHNIQUES | 160 |
| 4.7.1 | <i>Les membranes</i> | 161 |
| 4.7.2 | <i>Les produits d'intérieur</i> | 161 |
| 4.7.3 | <i>Le marché</i> | 162 |
| 4.8 | LES CHIFFRES DE LA DOUANE | 162 |
| 4.9 | LA GESTION DES DÉCHETS | 163 |
| 4.9.1 | <i>Déchets des matériaux composites</i> | 163 |
| 4.9.1.1 | La situation actuelle | 164 |
| 4.9.1.2 | L'étude Rhône Alpes | 164 |
| 4.9.1.3 | Typologie des entreprises oeuvrant dans le matériau composite | 165 |
| 4.9.1.4 | Analyse des déchets de production | 166 |
| 4.9.2 | <i>Le Traitement des véhicules hors usage (VHU)</i> | 167 |
| 4.9.3 | <i>Traitement des déchets électrotechniques</i> | 167 |
| 4.10 | LES AUTRES FIBRES UTILISÉES EN TANT QUE RENFORT | 167 |
| 4.10.1 | <i>Les fibres de synthèse</i> | 167 |
| 4.10.1.1 | La fibre de carbone | 167 |
| 4.10.1.1.1 | Le marché et les applications | 168 |
| 4.10.1.1.2 | Les fabricants mondiaux | 169 |
| 4.10.1.2 | La fibre d'aramide | 169 |
| 4.10.2 | <i>Les fibres naturelles</i> | 170 |
| 4.10.2.1 | Présentations des différentes fibres d'origine naturelles | 170 |
| 5 | MÉTHODES DE COMPTAGE ET D'IDENTIFICATION DES FIBRES | 173 |
| 5.1 | MICROSCOPIE OPTIQUE À CONTRASTE DE PHASE (MOCP) | 173 |
| 5.2 | MICROSCOPIE OPTIQUE À LUMIÈRE POLARISÉE (MOLP) | 174 |
| 5.3 | MICROSCOPIE ELECTRONIQUE À BALAYAGE ANALYTIQUE (MEBA) ET MICROSCOPIE ELECTRONIQUE À TRANSMISSION ANALYTIQUE (META) | 174 |
| 5.4 | MEBA | 175 |
| 5.5 | META | 175 |
| 5.6 | COMPARAISON ENTRE MICROSCOPIE OPTIQUE ET MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE | 175 |
| 6 | EVALUATION DE L'EXPOSITION DE LA POPULATION GÉNÉRALE ET DES TRAVAILLEURS AUX LAINES MINÉRALES ET AUX FILAMENTS DE VERRE CONTINUS | 177 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.1 | EXPOSITION DE LA POPULATION GÉNÉRALE | 177 |
| 6.1.1 | <i>Les laines minérales dans les bâtiments</i> | 177 |
| 6.1.1.1 | Bâtiments non résidentiels | 178 |
| 6.1.1.2 | Pose d'isolant à base de FMA dans des bâtiments résidentiels | 181 |
| 6.1.1.3 | Retrait de laines minérales isolantes | 182 |
| 6.1.1.4 | Environnement urbain et rural | 183 |
| 6.1.1.5 | Autres données synthétisées | 184 |
| 6.2 | EXPOSITION PROFESSIONNELLE | 189 |
| 6.2.1 | <i>La base de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques COLCHIC</i> | 189 |
| 6.2.1.1 | Présentation de la base COLCHIC | 189 |
| 6.2.1.2 | Les données d'exposition aux fibres de verre | 189 |
| 6.2.1.2.1 | Analyse globale | 190 |
| 6.2.1.2.2 | Evolution des expositions au cours du temps | 190 |
| 6.2.1.2.3 | Les secteurs d'activités | 191 |
| 6.2.1.2.4 | Les métiers exposés | 193 |
| 6.2.1.2.5 | Les laines minérales et matériaux à base de filament continu | 194 |
| 6.2.1.3 | Les données d'exposition aux fibres de roche | 197 |
| 6.2.1.3.1 | Analyse globale | 197 |
| 6.2.1.3.2 | Evolution des expositions au cours du temps | 198 |
| 6.2.1.3.3 | Les secteurs d'activités | 198 |
| 6.2.1.3.4 | Les métiers exposés | 199 |
| 6.2.1.4 | Les données d'exposition aux fibres de laitier | 200 |
| 6.2.1.4.1 | Analyse globale | 200 |
| 6.2.1.4.2 | Evolution des expositions au cours du temps | 201 |
| 6.2.1.4.3 | Les secteurs d'activités | 202 |
| 6.2.1.4.4 | Les métiers exposés | 202 |
| 6.2.1.5 | Évolution des populations de fibres au cours du temps | 203 |
| 6.2.1.5.1 | Distributions des valeurs du rapport R pour les fibres de verre : filament continu et laine | 203 |
| 6.2.1.5.2 | Fibres de roche | 205 |
| 6.2.1.6 | Conclusions sur les données de la base Colchic | 207 |
| 6.2.2 | <i>La base de données EVALUTIL</i> | 207 |
| 6.2.2.1 | Présentation | 207 |
| 6.2.2.2 | Intérêts et limites d'EVALUTIL | 207 |
| 6.2.2.2.1 | Hétérogénéité des données | 207 |
| 6.2.2.2.2 | Représentativité des données | 208 |
| 6.2.2.3 | Résultats | 208 |
| 6.2.2.4 | Discussion | 213 |
| 6.2.3 | <i>Conclusion commune aux bases COLCHIC et EVALUTIL</i> | 213 |
| 6.3 | EVALUATION DE LA PRÉVALENCE DE L'EXPOSITION PROFESSIONNELLE | 215 |
| 6.3.1 | <i>Evaluation de la prévalence de l'exposition professionnelle aux laines minérales et filaments de verre continus</i> | 215 |
| 6.3.1.1 | Synthèse et conclusion | 217 |
| 7 | CONCLUSIONS DU GROUPE DE TRAVAIL | 218 |
| 7.1 | LES LAINES MINÉRALES | 218 |
| 7.1.1 | <i>Composition chimique</i> | 218 |
| 7.1.2 | <i>Diamètre moyen</i> | 218 |
| 7.1.3 | <i>Liants</i> | 219 |
| 7.1.4 | <i>Marché de l'isolation thermique</i> | 219 |
| 7.1.5 | <i>Présentation et usages</i> | 219 |
| 7.1.6 | <i>Identification</i> | 220 |
| 7.1.7 | <i>Vieillessement</i> | 220 |
| 7.1.8 | <i>Les déchets de chantiers en laines minérales :</i> | 220 |
| 7.2 | LES FILAMENTS DE VERRE CONTINUS | 220 |
| 7.2.1 | <i>Définition et propriétés</i> | 220 |
| 7.2.2 | <i>Utilisation</i> | 220 |
| 7.2.3 | <i>Marché</i> | 220 |
| 7.3 | MÉTROLOGIE DES FIBRES | 221 |
| 7.4 | EXPOSITION DE LA POPULATION | 221 |
| 7.4.1 | <i>Exposition des travailleurs</i> | 221 |
| 7.4.2 | <i>Estimation de la prévalence d'exposition professionnelle</i> | 222 |
| 7.4.3 | <i>Exposition de la population générale aux laines minérales</i> | 222 |
| 8 | BIBLIOGRAPHIE | 223 |

Expertise collective : synthèse et conclusions**SYNTHÈSE de l'EXPERTISE COLLECTIVE****Relatives aux « fibres minérales artificielles :
laines minérales et filaments continus de verre
Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs »**

Saisine Afsset n°« 2004/012 »

Ce document synthétise les travaux du groupe de travail «fibres minérales artificielles» et présente les compléments du Comité d'Experts Spécialisés.

Présentation de la question posée

L'Afsset a été saisie le 20 juillet 2004 par ses tutelles ministérielles, en l'occurrence la Direction Générale de la Santé, la Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale et la Direction des Relations au Travail, afin de procéder à une évaluation de l'exposition actuelle et passée de la population générale et professionnelle aux fibres minérales artificielles siliceuses (FMA). Les principaux objectifs se déclinent en deux axes :

- préciser les applications passées et actuelles relatives à ces fibres, notamment l'historique de leur emploi, leur accessibilité, le devenir après usage, les caractéristiques techniques et l'évolution des matériaux fibreux avec le vieillissement de l'ouvrage. L'étude doit également recenser les additifs présents dans ces fibres, les évolutions techniques et l'existence de produits ou procédés de substitution non dangereux ou moins dangereux en indiquant la fréquence d'utilisation de ces alternatives ;
- évaluer l'exposition de la population générale et professionnelle.

Un précédent rapport publié en avril 2007 a traité prioritairement des fibres céramiques réfractaires et des fibres de verre à usage spécial de type E et 475 Glass. Le présent rapport s'inscrit dans la continuité et s'intéresse aux autres représentants des FMA, en l'occurrence les laines minérales et les filaments continus de verre.

Les laines minérales et les filaments continus de verre ont été classés dans le groupe 3 du CIRC c'est-à-dire « Inclassable quant à leur cancérogénicité pour l'Homme ». Ils sont exonérés de la classification en tant que substance cancérogène par l'Union Européenne lorsqu'ils répondent aux critères de la directive européenne 97/69/CE¹. Les laines minérales restent classées irritantes pour la peau.

¹ Note Q de la directive EU 97/69/CE

La classification comme cancérogène ne doit pas s'appliquer s'il peut être établi que la substance remplit l'une des conditions suivantes :

-Un essai de biopersistance à court terme par inhalation a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 µm ont une demi-vie pondérée inférieure à 10 jours.

-ou un essai de biopersistance à court terme par instillation intratrachéale a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 µm ont une demi-vie pondérée inférieure à 40 jours.

- Ou un essai intrapéritonéal approprié n'a montré aucune évidence d'excès de cancérogénicité

- Ou un essai à long terme par inhalation approprié a conduit à une absence d'effets pathogènes significatifs ou de modification néoplasiques

Note R

La classification comme cancérogène ne doit pas s'appliquer aux fibres dont le diamètre moyen géométrique pondéré par la longueur moins deux erreurs types est supérieur à 6 µm

Organisation de l'expertise

L'Afsset a confié au Comité d'Experts Spécialisés (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Ce dernier a mandaté le groupe de travail « fibres minérales artificielles » pour la réalisation des travaux d'expertise.

Les travaux d'expertise du groupe de travail ont été soumis régulièrement au CES. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise » avec pour objectif de respecter les points suivants : compétence, indépendance, transparence, traçabilité.

Description de la méthode

La partie technique relative à l'utilisation et aux applications passées et actuelles des laines minérales et des filaments continus de verre a été instruite par l'Agence. Elle a auditionné certains industriels concernés, contacté des organismes publics susceptibles de détenir des informations, mandaté des cabinets spécialisés pour faire des études et réalisé une large revue de la littérature.

Le groupe de travail a animé et orienté les travaux réalisés par l'Afsset. Il a apporté un regard critique sur l'expertise technique produite. Par ailleurs, il a synthétisé, en l'état actuel des connaissances, les éléments disponibles en matière d'évaluation de l'exposition de la population générale et professionnelle à ces fibres en s'appuyant sur les données publiées dans la littérature scientifique, ou extraites d'un certain nombre de bases de données.

Résultat de l'expertise collective

1-Les laines minérales

Les laines minérales sont des matériaux d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie. Elles incluent les laines de verre, élaborées à partir de sable, les laines de roche, élaborées à partir de basalte, et les laines de laitier élaborées à partir de scories de hauts-fourneaux (ces dernières sont souvent assimilées aux laines de roche).

1-1 Composition chimique des fibres : Les laines minérales se composent principalement de silice (40 à 70 %), d'alumine et de divers oxydes. Au début des années 1990, les producteurs ont modifiée la composition chimique afin d'accroître la solubilité de ces fibres dans les tissus biologiques ; elle a continué à évoluer pour correspondre aux dispositions de la directive européenne 97/69/CE et satisfaire aux critères d'exonération du classement cancérogène¹.

1-2 Diamètre moyen : Depuis les deux dernières décennies, la tendance est à une diminution continue du diamètre des fibres produites par les industriels. A l'heure actuelle, les chiffres disponibles établissent ce diamètre moyen entre 3 et 8 µm.

1-3 Liants : En règle générale, les laines minérales contiennent, outre des fibres, 3 à 5% de liants organiques (résines formo-phénoliques) qui assurent la cohésion du produit et moins de 1% d'huile qui limite l'émission de poussière et l'absorption de l'eau. Suite à une réaction chimique et thermique, le liant devient solide et libère une quantité résiduelle de formaldéhyde (recherché pour son activité biocide) susceptible d'émaner du produit lors de la pose ou de l'utilisation. Une étude réalisée à la demande de l'Afsset, montre que 8 produits courants d'isolation testés (4 neufs et 4 anciens), ont des émissions en composés

organiques volatils (COV) respectant les seuils fixés par le protocole Afsset 20062, à l'exception du formaldéhyde. Les émissions de formaldéhyde, principal composé dégagé, peuvent perdurer, même plusieurs années après la pose, comme le montrent des essais réalisés sur les produits anciens.

Pour certaines applications telles que les fours électroménagers, les producteurs Européens proposent des solutions sans liant organique. A noter que les laines de laitier ne contiennent pas de liant.

1-4 Marché de l'isolation thermique : Il est en forte augmentation depuis 20 ans. En France, les quantités de laines minérales utilisées dans le bâtiment pour l'année 2000 étaient de l'ordre de 12 à 13 millions de m³ pour la laine de verre, et de 3 à 4 millions de m³ pour la laine de roche. A l'heure actuelle, les laines minérales représentent entre 60 et 70 % des matériaux d'isolation utilisés en France.

1-5 Présentation et usages : Les laines minérales répondent favorablement aux exigences réglementaires, en termes d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie.

Leurs usages sont largement répandus dans le bâtiment, l'aéronautique, la construction navale, etc.

Les laines minérales existent sous différentes formes: panneaux rigides, panneaux ou rouleaux semi-rigides, rouleaux souples, flocons, coquilles.

Le bâtiment représente 90 % des usages et concerne l'isolation des toits, des murs, des planchers et l'étanchéité dans le secteur des bâtiments résidentiels et non résidentiels. A noter que la technique d'isolation des toitures utilisant la laine soufflée en flocons est de plus en plus utilisée, alors que cette technique est a priori la plus émissive en termes de fibres.

Le calorifugeage des tuyauteries ou des équipements thermiques industriels représente 5 % des quantités de laine minérale utilisée.

Les autres usages, concernant un grand nombre d'applications et de produits, représentent les 5 % restants (projection ou flocage notamment pour la protection incendie des bâtiments en mélange avec des additifs (plâtres, ciment...), appareils électroménagers, ...). A noter que la France est le plus important utilisateur européen de la technique par projection.

1-6 Identification et traçabilité : Il n'existe pas de code ou de marquages spécifiques inscrits sur la laine minérale (aucune réglementation ne l'exige). Toutefois, les producteurs ont rédigé des fiches de données de sécurité.

1-7 Vieillessement : il correspond à toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement. Les données disponibles restent actuellement limitées. Une étude réalisée à la demande de l'Afsset suggère que les matériaux vieillissent émettent davantage de fibres au moment de leur retrait que lors de l'installation de produits neufs.

1-8 Déchets : Les déchets de chantiers sont admis en décharge pour déchets non dangereux (Centre d'Enfouissement Technique de classe 2).

2 Les filaments de verre continus

Ce sont des fibres de verre d'une longueur suffisante pour être compatible avec une utilisation sous forme de textiles.

² Procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de composés organiques volatils et de critères sanitaires. Octobre 2006. Disponible sur www.afsset.fr.

2-1 Propriétés : Les matériaux de base destinés à la fabrication du verre incluent la silice, la chaux, le kaolin, l'alumine... dont les proportions aboutissent à différents types de verre aux propriétés chimiques et physiques particulières.

Le diamètre nominal des fibres de verre à filaments continus s'établit entre 3 et 25 µm, toutefois la variabilité est faible au niveau d'une référence commerciale.

A la sortie de la filière, les filaments reçoivent un revêtement de surface protecteur appelé ensimage. Il a pour but de lier les filaments de base en les revêtant d'une pellicule lubrifiante destinée à les protéger au cours de la fabrication du tissu.

2-2 Utilisation : Il existe une grande diversité d'utilisation de ces fibres, leur principale finalité (environ 90% de leur usage) étant de servir de renfort dans les matériaux composites.

Les composites Fibres-Résine sont les plus répandus. Ils sont constitués :

d'une ossature conçue jusqu'à 90% en volume de filaments appelée renfort qui assure la tenue mécanique ;

d'une matrice qui lie les fibres renforts et répartit les efforts. Par ailleurs, elle assure la protection chimique et la cohésion des fibres ;

d'éléments additionnels comme les charges³, l'ensimage, etc

De nombreux procédés sont mis en œuvre pour fabriquer les matériaux composites dont le plus utilisé reste le moulage par injection.

2-3 Marché : La production mondiale des filaments de verre continus a augmenté de 5%/an au cours des 25 dernières années. Pour la période 2005-2008, cette progression est de 6,5% avec plus de 3500 ktonnes de fibres de verre produites pour 2008.

L'Europe représente un tiers de la production mondiale de composites et la France environ 16 % de la production européenne soit 270 à 300 ktonnes avec plusieurs centaines d'entreprises de toutes tailles. Les secteurs utilisant ces matériaux sont par ordre décroissant de tonnage utilisé : le bâtiment et les infrastructures (équipements sanitaires, toiles à peindre, éclairage, ponts) ; les moyens de transport (carrosserie, pare-chocs, tableaux de bord); l'électricité (armoires de distribution, chemins de câbles) ; l'électronique, (circuits imprimés); la plaisance et les équipements de loisir (bateaux, piscines, etc.); l'équipement industriel (tuyaux, réservoirs, pâles d'éoliennes), les biens de consommations (capotage d'appareils électroménagers, stylos) ; etc...

2-4 Déchets : Les déchets issus des filaments de verre continus sont considérés selon la réglementation, comme des déchets industriels banals. Plus de 90 % des déchets de production en composites thermodurcissables sont actuellement mis en décharge.

3- Métrologie des fibres

En milieu professionnel, la mesure des FMA s'effectue réglementairement par microscopie optique à contraste de phase, MOCP.

Pour la mesure des expositions environnementales, la microscopie optique à lumière polarisée (MOLP) et la microscopie électronique à balayage analytique (MEBA) sont les méthodes les plus adaptées. Les fibres mesurées dans l'air des bâtiments peuvent être de nature différente. La MOCP ne convient pas puisqu'elle ne permet pas leur identification.

A noter que les niveaux de FMA dans l'air mesurés dans les bâtiments par les techniques MOLP et MEBA diffèrent d'un à deux ordres de grandeur. Dans les essais où les niveaux d'émission de laines minérales sont faibles, la MEBA, utilisée à un fort grossissement, n'a pas la sensibilité suffisante pour détecter de telles concentrations.

³ Toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien simplement de réduire le prix de revient du matériau transformé.

4- Exposition de la population :

4-1 Exposition des travailleurs

Les données, issues des bases COLCHIC et Evalutil, témoignent de la large utilisation des laines minérales dans un grand nombre de secteurs d'activité.

Des éléments issus de la base COLCHIC attestent d'une diminution des concentrations en milieu professionnel au cours du temps.

Pour les laines minérales, les concentrations en milieu professionnel montrent que, sur l'ensemble des deux bases de données, le taux de dépassement de la VME4 (valeur moyenne d'exposition) fixée à 1 f/ml (soit 106 f/m³) est de l'ordre de 10% (notamment lors d'opérations d'usinage, soufflage,...).

Par ailleurs, l'analyse des résultats de la base COLCHIC, pour différentes populations de fibres, met en évidence une augmentation au cours du temps de la proportion de fibres fines en suspension dans l'air. Cette situation est probablement liée à une modification des caractéristiques dimensionnelles des laines minérales dans les vingt dernières années.

Très peu de données ont pu être collectées pour les activités associées soit à un retrait de laines minérales usagées (arrachage, grattage...), soit à une intervention dans des locaux contenant ce type de matériaux. Cependant, les informations disponibles indiquent que ces activités sont plus exposantes pour le travailleur que la pose ou la production.

Pour les filaments continus de verre, les concentrations en milieu professionnel apparaissent moins importantes et le taux de dépassement de la VME fixée à 1 f/ml reste également très faible. L'exposition peut être aussi associée à des particules allongées émises notamment lors de l'usinage de matériaux composites. Dans ce cas, elles proviennent soit de la résine, soit de la matrice.

4-2 Estimation de la prévalence d'exposition professionnelle

Les données disponibles sont parcellaires, particulièrement pour les filaments continus, et ne permettent de donner qu'un ordre de grandeur. L'exposition vie entière aux filaments continus concerne vraisemblablement moins de 1% des travailleurs. On peut estimer que la prévalence de l'exposition professionnelle vie entière aux laines minérales est de l'ordre de 10% chez les hommes, et de 1% chez les femmes. Une matrice emplois-expositions aux laines minérales est actuellement en cours de finalisation au Département santé travail de l'InVS et devra fournir prochainement plus de précisions.

4-3 Exposition de la population générale aux laines minérales

Le nombre de données disponibles est limité. Les mesures effectuées dans l'environnement urbain parisien, en situation de fond, ne dépassaient pas la valeur de 2 f/m³ (en MOLP) pour les fibres de diamètre <3µm. Lors d'une étude portant sur deux chantiers de retrait des laines minérales, les concentrations retrouvées à 30 m du chantier étaient 100 fois supérieures au fond de pollution.

Les concentrations mesurées dans des bâtiments non résidentiels en France sont également très faibles. A titre indicatif, 75% des mesures réalisées dans le cadre d'investigations ponctuelles étaient inférieures à 6 f/m³.

⁴ Circulaire DRT n°95-4 du 12 janvier 1995 modifiant et complétant la circulaire du 19 juillet 1982 modifiée / Circulaire DRT n°8 du 21 août 1996 modifiant et complétant la circulaire du 19 juillet 1982 modifiée. Pour rappel, la VME se définit comme une valeur admise pour la moyenne dans le temps des concentrations auxquelles un travailleur est effectivement exposé au cours d'un poste de 8 heures. La valeur limite 8 heures est destinée à protéger les travailleurs des effets d'une exposition prolongée à des agents chimiques. Des modifications physiologiques réversibles sont parfois tolérées, aucune atteinte organique ou fonctionnelle de caractère irréversible ou prolongée n'est admise à ce niveau d'exposition pour la grande majorité des travailleurs.

Abréviations

ACERMI: Association pour la Certification des matériaux isolants

ACGIH: American Conference of Industrial Hygienists

Ademe : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

AFNOR : Association Française de Normalisation

Afsset : Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail

ANPE : Agence Nationale Pour l'Emploi

APFE : Association des Producteurs de Fibres de verre Européens

ARAMM : Agence Rhone Alpes pour la Maitrise des Matériaux

ASTM : American Society for Testing and Materials

ATE : Agrément Technique Européen

ATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry

BMC/ Bulk Molding Compound

BTP : Batiments Travaux Publics

CAREX : Carcinogen Exposure

CES : Comité d'Experts Spécialisés

CET : Centre d'Enfouissement Technique

CMR : Cancérogène Mutagène Reprotoxique

CnamTS : Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés

COV : Composés Organiques Volatils

Cram : Caisse Régionale d'Assurance Maladie

CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

CUAP : Common Understanding Assessment Procedure

Dares : Direction de l'Animation de la Recherche, des Etudes et des Statistiques

DEEE : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques

DGCCRF : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes

ECFIA : European Ceramic Fibres Industry Association

EINECS: European INventory of Existing Commercial chemical Substances

ELINCS: European List of Notified Chemical Substances

ENSAM: Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

EUCEB : European Certification Board for Mineral Wool Products

EUMEPS: European Manufacturers of Expanded Polystyrène

EURIMA: European Mineral Wool Manufacturers Association

FCR: Fibre Céramique Réfractaire

FDES : Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire

FDS : Fiche de Données Sécurité

FILMM : Fabricants d'Isolants en Laines Minérales Manufacturées

FMA : Fibre Minérale Artificielle

FNADE : Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement

GPIC : Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites

GT : Groupe de Travail

HSE : Health and Safety Executive

IARC : International Agency for Research on Cancer /Centre International de Recherche sur le Cancer

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

Inserm: Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

InVS : Institut de Veille Sanitaire

IPCS: International Program on Chemical Safety

ISPED : Institut de Santé Publique, d'Épidémiologie et de Développement

LEPI : Laboratoire d'Etudes des Particules Inhalées – Ville de Paris

LNE : Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

MEBA : Microscopie Electronique à Balayage Analytique

META : Microscopie Electronique à Transmission Analytique

MLE : Maximum Likelihood Estimate

MMMMF: Man-Made Mineral Fiber

MMVF: Man-Made Vitreous Fiber

MOCP : Microscopie Optique à Contraste de Phase

MOLP : Microscopie Optique à Lumière Polarisée

NAF : Nomenclature d'Activités Française

NEHC : Navy Environmental Health Center

NIOSH: National Institute of Occupational Safety and Health

NTP: National Toxicology Program

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

OSHA: Occupational Safety and Health Administration

PIR : Polyisocyanate

PNSE : Plan National Santé Environnement

PSE : Polystyrène Expansé

PST : Plan Santé au Travail

PTFE: Polytétrafluoroéthylène

PUR : Polyuréthane

PVOH: Polyvinyl Alcool

RISE : Réseau d'Information en Santé Environnement

ROME : Répertoire Opérationnel des Métiers et des Emplois

RPA: Risk and Policy Analyst

RTM : Resin Transfer Molding

SPLR: Syndicat Professionnel des Fabricants de Laine de Roche

S-RIM: Structural Reaction Injection Molding

TD: Thermodurcissable

TIMA: Thermal Insulation Manufacturers Association

TP: Thermoplastique

TSCA: Toxic Substances Control Act

US – EPA: United-States – Environmental Protection Agency

VHU : Véhicules hors d'usage

VLEP: Valeurs Limites d'exposition Professionnelle

VME: Valeur Moyenne d'exposition

WHO: World Health Organisation

XPS: Polystyrène Extrudé

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1: compositions des laines minérales (IARC, 2002 ; FILMM, 2007 ; Inserm, 1999 ; TIMA, 1991) | 42 |
| Tableau 2: propriétés physiques suivant le type de FMA (TIMA, 1991 ; ATSDR, 2004 ; Inserm, 1999) | 43 |
| Tableau 3: revue historique concernant la production des FMA (De Vuyst et al., 1995) | 44 |
| Tableau 4: mesure du diamètre des fibres de laine de verre, de laine de laitier et de laine de roche (ATSDR, 2004) | 45 |
| Tableau 5: diamètre des fibres de laine de roche et de laitier (IARC, 2002) | 47 |
| Tableau 6: diamètre des fibres de laine de verre (IARC, 2002) | 47 |
| Tableau 7: Niveaux de concentration en formaldéhyde dans l'air de locaux isolés avec les laines manufacturées (FILMM, 2007) | 51 |
| Tableau 8: volumes de production pour les produits à base de laines de verre, de roche et de laitier aux Etats-Unis (IARC, 1988 ; ATSDR, 2004) | 58 |
| Tableau 9: nombre d'usines fabricant de la laine de verre, de roche et de laitier dans différentes régions du monde (IARC, 2002) | 59 |
| Tableau 10: volumes de laine de verre, de roche et de laitier produits par région (milliers de tonnes) (IARC, 2002) | 59 |
| Tableau 11: demande mondiale pour l'isolation (IARC, 2002) | 60 |
| Tableau 12: demande en laine de roche / de laitier et laine de verre par région du monde (IARC, 2002) | 60 |
| Tableau 13: Cessions de produits contenant des laines minérales entre sites de production pour la France (d'après Export Helpdesk, 2007) | 63 |
| Tableau 14: exemples d'application par type de laines minérales (TIMA, 1991) | 81 |
| Tableau 15: secteurs industriels et applications communes des laines minérales (site EURIMA, 2007 ; rapport du RISE) | 82 |
| Tableau 16: normes EN appliquées aux isolants en fonction de leur famille | 90 |
| Tableau 17: matériaux d'isolation pouvant être employés selon les applications souhaitées | 100 |
| Tableau 18: comparaison des matériaux d'isolation | 101 |
| Tableau 19: marché français de l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, par type de matériau, 2000 – 2004 (MSI, 2006) | 106 |
| Tableau 20: nombre de bâtiments résidentiels construits en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 107 |
| Tableau 21: techniques d'isolation des toitures pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 109 |
| Tableau 22: isolation des toitures par de la laine soufflée en vrac pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 110 |
| Tableau 23: produits d'isolation des toitures pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 111 |
| Tableau 24: techniques d'isolation des murs pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 113 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 25: produits d'isolation des murs pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 113 |
| Tableau 26: techniques d'isolation des premiers planchers pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 115 |
| Tableau 27: surfaces construites pour les bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 117 |
| Tableau 28: part des laines minérales utilisées par l'isolation des toitures pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 118 |
| Tableau 29: techniques d'isolation des murs pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 119 |
| Tableau 30: part des laines minérales utilisées par l'isolation des toitures pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008) | 119 |
| Tableau 31: opérations pouvant occasionner une exposition aux laines minérales (Inserm, 1999) | 122 |
| Tableau 32: caractéristiques des différents types de verre utilisés pour la fabrication des filaments continus (NEHC,1997; Saint-Gobain VetrotexDeutschlan GmbH,2002) | 129 |
| Tableau 33: masses linéiques (en tex) des fils de base commercialisés en fonction du diamètre et du nombre de filaments | 134 |
| Tableau 34: Désignation des fils de verre textile (Guillon D, 1995) | 138 |
| Tableau 35: les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables (GAY D,1991) | 148 |
| Tableau 36: les caractéristiques des différentes matrices thermodurcissables (Berreur et al., 2002) | 149 |
| Tableau 37: les caractéristiques des différentes matrices thermoplastiques (Berreur et al., 2002) | 150 |
| Tableau 38: Les différents procédés mis en œuvre lors de la fabrication des matériaux composites | 154 |
| Tableau 39: taux de progression du marché de la fibre de verre | 156 |
| Tableau 40: Résultats de mesure en MOLP dans des bâtiments | 179 |
| Tableau 41: mesures MOLP de FMA alvéolaires sur chantiers de retrait de LMI (Boullanger, 2007) | 183 |
| Tableau 42: Synthèse de données de la littérature quant à l'exposition de la population générale aux laines minérales | 185 |
| Tableau 43: gammes de concentrations ($L \geq 5 \mu\text{m}$ et $D \leq 3 \mu\text{m}$) rencontrées dans des scénarios d'exposition typiques (d'après Inserm, 1999) | 188 |
| Tableau 45: métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de verre | 193 |
| Tableau 45: métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de laitier | 202 |
| Tableau 46: Les données des études cas-témoins portant sur les expositions professionnelles aux fibres minérales artificielles | 216 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: présentation générale de la famille des fibres (adaptée de TIMA, 1991) | 29 |
| Figure 2: typologie des FMA par l'OMS (WHO, 1997) | 30 |
| Figure 3: caractéristiques principales des FMA siliceuses vitreuses (adapté de (De Vuyst P. et al.,1995; IARC,2002) | 31 |
| Figure 4: lien entre la classification européenne et la composition chimique des FMA (ECFIA,2005) | 32 |
| Figure 5: procédé rotatif employé pour la production de laines de verre (IARC, 2002 ; FILMM, 2007) | 36 |
| Figure 6: ligne de production d'une laine de verre (FILMM, 2007) | 37 |
| Figure 7: procédé rotatif employé pour la production de laines de roche (IARC, 2002 ; FILMM, 2007) | 38 |
| Figure 8: ligne de production d'une laine de roche ou de laitier (FILMM, 2007) | 39 |
| Figure 9: modes de fabrication des laines minérales (FILMM, 2007) | 40 |
| Figure 10: distribution granulométrique d'un échantillon de laines de verre et de laines de roche (FILMM, 2007) | 49 |
| Figure 11: Facteurs d'émission spécifiques ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) en formaldéhyde pour les 4 produits neufs (CSTB, 2007) | 53 |
| Figure 12: Facteurs d'émission spécifiques ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) en formaldéhyde pour les dalles de plafond neuve et vieillie (CSTB,2007; Nielsen et al.,1997) | 54 |
| Figure 13: production des laines minérales artificielles vitreuses en Europe : 2.5 millions de tonnes/an ((ECFIA,2005; Environnement Canada,1993) | 61 |
| Figure 14: données de la construction en France (logements neufs) (FILMM, 2007) | 64 |
| Figure 15: ventes de laines minérales (laine, roche, laitier) entre 1980 et 2004 (FILMM, 2007) | 65 |
| Figure 16: ventes de laines minérales (verre, roche, laitier) en tonnes entre 1982 et 2004 (FILMM, 2007) | 66 |
| Figure 17: ventes de laines minérales (verre, roche, laitier) en m^3 entre 1982 et 2004 (FILMM, 2007) | 66 |
| Figure 18: illustration du soufflage de laines minérales (Johns Manville company,2008) | 68 |
| Figure 19: diversité des présentations proposées pour les laines minérales (FILMM, 2007) | 69 |
| Figure 20: intervenants impliqués dans la projection de laines minérales (Saint Gobain,2007) | 72 |
| Figure 21: présentation des secteurs d'utilisation des laines minérales associant la localisation de l'isolant et sa fonction (CSHPF, 2004) | 75 |
| Figure 22: illustration des trois modes d'isolation des combles par les laines minérales (FILMM, 2007) | 77 |
| Figure 23: exemples d'emplois de produits d'isolation à base de laines minérales dans le bâtiment (CHSPF, 2004) | 80 |
| Figure 24: isolation de tuyauteries et d'une étude ou d'un four grâce à un doublage de laines minérales (FILMM, 2007 ; Saint Gobain, 2008) | 83 |
| Figure 25: laine minérale employée pour une culture hors sol (FILMM, 2007) | 84 |
| Figure 26: répartition de l'utilisation des laines minérales (FILMM, 2007) | 85 |
| Figure 27: évolution historique des principales applications pour les laines minérales (FILMM, 2007) | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figure 28: illustration d'un panneau de XPS (EXIBA, 2007) | 92 |
| Figure 29: la répartition du marché français de l'isolation (FILMM, 2007) | 103 |
| Figure 30: estimation de l'évolution du marché français de l'isolation thermique, par secteur, entre 2000 et 2009 (MSI, 2006) | 105 |
| Figure 31: ligne de fibrage par fusion directe ((Guillon D, LAMANICHE J,1995a) | 132 |
| Figure 32: ligne de fabrication de fil sillionne (Guillon D, 1995) | 132 |
| Figure 33: mécanisme d'adhésion des silanes (Guillon D, 1995) | 136 |
| Figure 34: présentation des différents produits en verre textile (Guillon D, 1995) | 143 |
| Figure 35: récapitulatif du procédé de fabrication des filaments de verre continu (Guillon D, 1995) | 144 |
| Figure 36: descriptif de la filière des professionnels dans le champ des composites (GPIC,2008) | 146 |
| Figure 37: les différents éléments constitutifs d'un composite (Bahlouli N,2008) | 146 |
| Figure 38: les différentes familles de matrices utilisées dans l'élaboration d'un matériau composite (Baïlon JP.,2000) | 147 |
| Figure 39: différentes étapes de fabrication d'un matériau composites (Bahlouli N., 2008) | 155 |
| Figure 40: évolution de la production mondiale de la fibre de verre (Owens Corning,2008) | 156 |
| Figure 41: variation du marché français des composites (GPIC, 2008) | 157 |
| Figure 42: marché mondial de la fibre de verre de renforcement (Saint-Gobain VetrotexInternational S.A,2001) | 158 |
| Figure 43: ventilation du marché français des composites (GPIC,2008) | 158 |
| Figure 44: le marché européen des composites (GPIC, 2008) | 159 |
| Figure 45: le marché des renforts verre par zone géographique (en volume) (Saint Gobain et Owen Corning, 2008) | 159 |
| Figure 46: répartition des effectifs des travailleurs français dans le secteur composites (Ademe,2004) | 160 |
| Figure 47: chiffres globaux des importations et exportations françaises des filaments de verre (Export Helpdesk) | 163 |
| Figure 48: Répartition des déchets composites de production en France (ARAMM, 2005) | 164 |
| Figure 49: composition des déchets composites thermodurcissable (ARAMM, 2005) | 165 |
| Figure 50: effectifs des entreprises oeuvrant dans le matériau composite (ARAMM, 2005) | 165 |
| Figure 51: analyse des gisements de déchets de matériaux composites (ARAMM, 2005) | 166 |
| Figure 52: principaux procédés de transformation de la fibre de carbone (BRISSON,2006c) | 168 |
| Figure 53: croissance du marché des fibres de carbone (BRISSON,2006a) | 169 |
| Figure 54: répartition de l'utilisation de la fibre d'Aramide en France (Roos, 2003) | 170 |
| Figure 55: les différents types de fibres d'origine naturelle (Balay C,2005) | 171 |
| Figure 57: Aperçu sur le marché des composites d'origine naturelle | 172 |
| Figure 57: Synthèse des mesures MOLP de FMA alvéolaires dans des bâtiments classées par ordre décroissant | 180 |
| Figure 58 : exposition de la population générale aux fibres ($L > 5 \mu\text{m}$) (d'après Schneider, 1996) | 184 |
| Figure 59: fibres de verre : courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI). | 190 |

| | |
|---|-----|
| Figure 60: fibres de verre, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1985 - 2007 | 191 |
| Figure 61: mesures d'exposition aux fibres de verre par secteur d'activité | 192 |
| Figure 62: distinction de l'exposition entre laine de verre et filaments de verre continus | 195 |
| Figure 63: graphe en boites: distinction de l'exposition entre laine de verre et filaments de verre continus | 195 |
| Figure 64: analyse par poste de travail de l'exposition aux laines de verre et filaments continus de verre | 196 |
| Figure 65: fibres de roche, courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI) | 197 |
| Figure 66: fibres de roche, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1988 - 2006 | 198 |
| Figure 67: fibres de roche, Secteurs d'activité où des mesures d'exposition ont été effectuées | 199 |
| Figure 68: fibres de laitier, Courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI) | 201 |
| Figure 69: fibres de laitier, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1986-2006 | 202 |
| Figure 70: fibres de laitier, secteurs d'activités ayant fait l'objet de mesures d'exposition de 1987 à 2007 | 202 |
| Figure 71: fréquence cumulée des rapports enregistrés entre 1998 et 2006 | 204 |
| Figure 72: évolution au cours du temps du rapport R pour les filaments continus | 204 |
| Figure 73: évolution au cours du temps du rapport R pour les laines minérales | 205 |
| Figure 74: évolution au cours du temps du rapport R pour les laines minérales | 205 |
| Figure 74: distribution des valeurs du rapport R pour les fibres de roche | 206 |
| Figure 75: graphe de régression pour l'évolution des laines minérales au cours du temps | 206 |
| Figure 76: concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de roche (métrologies individuelles) | 210 |
| Figure 77: concentrations observées dans le secteur du BTP lors de l'utilisation de laine de roche (métrologies individuelles) | 210 |
| Figure 78 : concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de verre (<i>métrologies individuelles</i>) | 211 |
| Figure 79: concentrations observées dans le secteur du BTP "Travaux d'isolation" lors de l'utilisation de laine de verre (métrologies individuelles) | 211 |
| Figure 80: concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de laitier (métrologies individuelles) | 212 |
| Figure 81: concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de filaments continus de verre (métrologies individuelles) | 212 |

AVANT-PROPOS

Le présent rapport fait suite à celui finalisé en janvier 2007 par le même groupe de travail, qui concernait également les fibres minérales artificielles mais ne traitait que de deux types de fibres : les fibres céramiques réfractaires et les fibres de verre à usage spécial. (Afsset 2007)

Les tutelles ministérielles (ministères de la santé, de l'écologie et du travail) qui ont saisi l'Afsset sur les applications des fibres minérales artificielles siliceuses (FMA) et l'évaluation de l'exposition de la population générale et professionnelle, ont souhaité que l'instruction de la saisine se déroule en deux temps. Les fibres céramiques réfractaires (FCR) et les fibres de verre à usage spécial de type E et 475 ont été jugées prioritaires étant donné leur classification internationale. Une première expertise a été finalisée et un rapport, accompagné de recommandations, a été rendu public en avril 2007. Le groupe de travail a poursuivi son travail en étudiant les deux autres types de fibres appartenant à la catégorie des FMA à savoir : les laines minérales (laines de roche, de verre et de laitier) et les filaments de verre continus.

Le présent rapport contient certains paragraphes issus de la première expertise concernant les FCR et fibres de verre à usage spécial (Afsset 2007). Cette redondance a pour but de faciliter la compréhension sans obliger le lecteur à retourner en permanence au texte précédent.

Ainsi par commodité de lecture, la description des FMA (laines minérales et filaments de verre continus), leur diamètre et leur classification autant européenne que celle de l'IARC ont été repris dans leur intégralité ; de même que la partie traitant des méthodes de détection et comptage des fibres.

Le chapitre 1 introductif rappelle le contexte et les objectifs de la saisine. Ce paragraphe général décrit les modalités de traitement de la saisine, expliquant les interactions entre les travaux d'investigation menés par l'agence et l'expertise collective conduite par le groupe de travail.

Le chapitre 2 donne des définitions générales sur les FMA, sur leur composition ainsi que leurs propriétés physico-chimiques. Il situe spécifiquement au sein de la famille des fibres minérales celles dont traite ce rapport (les laines minérales et les filaments de verre continus). Ce paragraphe est repris du rapport sur les FCR et les fibres de verre à usage spécial; ce fait est signalé explicitement au début de ce chapitre.

Le chapitre 3 traite spécifiquement des laines minérales qui incluent les laines de verre, de roche et de laitier. Il décrit leurs applications, leur production et cite certains produits utilisés pour les mêmes applications ainsi que les chiffres du marché de l'isolation. La dernière partie de ce chapitre traite de la maintenance dans le secteur des laines minérales, de l'accessibilité et moyens de repérage, du comportement des produits à base de laines minérales (service et vieillissement) et de la prise en charge et traitement des déchets contenant de ces laines

Le chapitre 4 traite des filaments de verre continus en partant de leur composition chimique pour relater le processus de leur fabrication et les intervalles de diamètre de la fibre finale produite. Des sous-chapitres spécifiques à leurs utilisations aussi bien dans les matériaux composites que dans les textiles techniques, –avec tout ce que cela implique comme éléments à leur additionner et techniques mises en œuvre–, sont détaillés avec des chiffres de production et le marché aussi bien mondial que français. Une dernière partie relative à d'autres fibres utilisées pour les mêmes applications clos ce chapitre.

Les chapitres 3 et 4 ont été rédigés par l'Afsset principalement à partir de documents mis à disposition et d'auditions auprès des producteurs et utilisateurs de laines minérales et de

filaments de verre continus. La rédaction se veut factuelle, dénuée d'interprétation et synthétise les données collectées. A la lecture de cette partie, le groupe de travail propose des commentaires en fin de chapitre dans un encadré nuancé en bleu.

Le chapitre 5 rappelle les méthodes de comptage et d'identification des fibres. Il est repris intégralement du précédent rapport. Seul, un sous paragraphe traitant de la comparaison entre microscopie optique et électronique a été rajouté suite à la finalisation d'une étude réalisée à la demande de l'Afsset.

L'évaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs aux Laines minérales et aux filaments de verre continus fait l'objet du chapitre 6. Elle est constituée de deux sous chapitre l'un relatif à la population générale, qui inclut une revue de la littérature et des données du LEPI, l'autre sur l'exposition professionnelle avec des données issues des bases Colchic et Evalutil. Une évaluation de la prévalence des travailleurs exposés est également proposée dans ce chapitre, aussi bien pour les laines minérales que pour les filaments de verre continus.

Cette partie a été rédigée par certains membres du groupe de travail (GT).

Enfin, la note de synthèse et les conclusions du rapport ont été rédigées en séance plénière par les membres du GT.

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) s'est prononcé, par avis du 5 février 2004, sur la protection de la population contre les risques pour la santé de l'exposition aux FMA siliceuses. Le document relève de nombreuses incertitudes dans les données épidémiologiques et générales sur les FMA notamment (Afsset 2007;CHSPF 2004):

- les dispositions réglementaires relatives à la classification, l'emballage, l'étiquetage, la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi, ne s'appliquent qu'aux substances et préparations et il apparaît difficile de maîtriser l'exposition de la population dès lors que des articles, équipements ou tout autre produit contenant des substances ou préparations dangereuses continuent à être en circulation sur le marché ;
- de nouveaux types de FMA ne cessent d'apparaître sur le marché ; pour la plupart d'entre elles on ne dispose d'aucune information sur leurs effets chez l'homme et les données expérimentales les concernant sont rares ;
- et le manque de connaissances relatives à l'impact du vieillissement sur la cohésion des matériaux contenant des FMA.

Compte tenu de toutes ces considérations, le CSHPF de France a établi de nombreuses recommandations et a demandé notamment de réaliser des enquêtes, afin de préciser :

- d'une part, en collaboration avec les professionnels concernés des métiers utilisateurs et des industries productrices de FMA, pour chaque type de fibre, et notamment les nouvelles FMA, les applications actuelles et passées, avec pour chacune d'entre elles l'historique de l'emploi (quantités mises en place et retraits annuels depuis le début de l'utilisation), la longévité des ouvrages concernés, et l'accessibilité des fibres ;

- d'autre part, des aspects techniques, en particulier l'évolution des matériaux fibreux avec le vieillissement de l'ouvrage.

Le CSHPF préconise d'évaluer l'exposition de la population résultant des applications actuelles et passées des FCR et des microfibrilles de verre de type E ou Glass-475. Cette requête a été traitée en priorité dans le 1^{er} rapport de l'Afsset précité.

Le CSHPF préconise ensuite de s'intéresser aux autres FMA, de préciser leurs applications et d'évaluer l'exposition de la population générale et professionnelle. C'est le sujet du présent rapport qui ne traite donc que des laines minérales et des filaments de verre continus.

La rédaction de la saisine s'inscrit également dans le cadre du Plan National Santé Environnement (PNSE) dont l'action 18 vise à limiter l'exposition de la population générale aux FMA.

Le Plan Santé au Travail 2005/2009 (PST) s'intéresse également à cette thématique puisqu'une des actions vise à améliorer les connaissances relatives aux expositions professionnelles.

Les FMA étudiées via cette saisine se définissent comme des fibres vitreuses ou amorphes ne possédant pas de structure cristalline. A titre indicatif, cette famille regroupe les FCR, les fibres de verre à usage spécial, les laines de verre, de roche, de laitier et les filaments de verre continus.

Les FMA sont apparues au cours des années 1950, bien avant l'interdiction de l'amiante, et sont depuis utilisées dans des applications multiples et variées avec des caractéristiques diverses. Ainsi, la substitution de l'amiante a eu une incidence sur l'augmentation de la production de certaines fibres minérales, à titre d'exemple celles des laines minérales utilisées en lieu et place de l'amiante pour l'isolation et la protection incendie ; mais les spécifications restent relativement divergentes comme pour les filaments de verre continus dont la principale utilisation se trouve dans la fabrication de matériaux composites.

Etant donné le manque de connaissances sur l'exposition de la population à ces fibres, le présent rapport souhaite faire la lumière sur les applications et l'utilisation des FMA en évaluant, de manière concomitante, l'exposition de la population générale et professionnelle.

1.2 Objet de la saisine

L'Afsset a été saisie le 20 juillet 2004 par ses tutelles ministérielles, en l'occurrence la Direction Générale de la Santé, la Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale et la Direction des Relations au Travail, afin de procéder à une évaluation de l'exposition actuelle et passée de la population générale et professionnelle aux FMA siliceuses (Cf Annexe 1). Les principaux objectifs se déclinent en deux axes :

- préciser les applications passées et actuelles relatives à ces fibres, notamment l'historique de leur emploi, leur accessibilité, le devenir après usage, les caractéristiques techniques et l'évolution des matériaux fibreux avec le vieillissement de l'ouvrage. L'étude devra également recenser les additifs présents dans ces fibres, les évolutions techniques et l'existence de produits ou procédés de substitution non dangereux ou moins dangereux en indiquant la fréquence d'utilisation de ces alternatives ;
- évaluer l'exposition de la population générale et professionnelle ;
- la priorité ayant été accordée aux FCR et aux fibres de verre à usage spécial de type E et 475 Glass dans un précédent rapport (Afsset, 2007), celui-ci ne traite que des laines de verre et des filaments continus de verre.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre pour instruire la saisine

L'agence a reconduit le même groupe de travail pour traiter la suite de cette saisine, il est rattaché au Comité d'Experts Spécialisés (CES) « Evaluation des risques liés aux milieux aériens », dit CES « air ». La prise en charge de cette saisine s'articule selon les axes suivants :

- la partie technique relative à l'utilisation et aux applications passées et actuelles des laines minérales et des filaments continus de verre est instruite par l'Agence. Elle réalise ainsi des investigations en auditionnant les industriels concernés afin de collecter les données. Au vu du taux de participation modéré des industriels, les données collectées ne se prétendent pas exhaustives et restent essentiellement qualitatives. Ce faible taux de réponse est à imputer essentiellement à la classification des fibres étudiées. En effet, beaucoup d'industriels et de fédérations d'industries contactés s'interrogeaient sur la pertinence d'investiguer un sujet pour lesquels les dangers associés leur semblaient maîtrisés au vu du classement Européen ou de l'IARC.
- Par ailleurs, l'agence a initié des contacts auprès de nombreux interlocuteurs susceptibles de détenir des données pertinentes au sein des ministères, des établissements tels que l'Institut de Veille Sanitaire (InVS), l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), le laboratoire d'étude des particules inhalées (LEPI) ou le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). Cette démarche qui se veut la plus exhaustive avait pour but d'obtenir une vision précise de la situation française. En parallèle, l'Agence a mandaté un cabinet anglais nommé Risk & Policy Analyst (RPA) afin de recueillir, au niveau européen, des données concernant les usages actuels et passés en analysant les tendances divergentes éventuelles.
- le groupe de travail anime et oriente l'étude réalisée par l'Afsset. Les experts interprètent, commentent les résultats obtenus et apportent un regard critique sur l'expertise technique produite. Par ailleurs, le groupe de travail synthétise, en l'état actuel des connaissances, les éléments disponibles en matière d'évaluation de l'exposition de la population générale et professionnelle à ces fibres en s'appuyant sur les données publiées dans la littérature scientifique, ou extraites d'un certain nombre de bases de données.

L'Agence a demandé au CSTB de mettre en place une étude visant à caractériser la libération des fibres dans l'air lors de différentes phases de manipulation de laines minérales isolantes vieillies naturellement. Cette étude expérimentale repose sur la réalisation d'essais en laboratoire et de mesures d'empoussièrement sur site. Par ailleurs, ce travail est associé à une étude conjointe entre le CSTB et le LEPI visant à la mise en place d'un programme de recherche méthodologique relatif au comptage des laines minérales en procédant à une comparaison entre trois différentes méthodes de comptage sur filtre.

2 Présentation des fibres minérales artificielles

Comme expliqué dans le préambule, ce chapitre est extrait en intégralité du précédent rapport Afsset (Afsset, 2007).

2.1 Définition d'une fibre et des FMA

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit une fibre comme étant « toute particule solide, naturelle ou artificielle, allongée à bords parallèles ayant une longueur supérieure à 5 μm , un diamètre inférieur à 3 μm et un rapport longueur / diamètre supérieur à 3 » (Inserm 1999). Les fibres constituent de manière générale une grande famille subdivisée en une multitude de sous familles selon leur nature physico-chimique et leur origine.

Les FMA siliceuses vitreuses, objet de la présente saisine, se composent principalement de silicates de calcium, magnésium, sodium, potassium, aluminium de bore ainsi que des traces d'oxydes et de métaux. Elles sont produites à partir de roche, de laitier, de verre ou d'argile. Ces fibres diffèrent des fibres minérales naturelles, comme l'amiante, par leur structure vitreuse et non cristalline (anisotropie). Il existe deux catégories de FMA : les laines et les filaments. Les filaments définissent les filaments de verre continus alors que les laines recourent les laines de verre, de roche, de laitier et les FCR (ATSDR 2002, 2004)

Les FMA ne se divisent pas longitudinalement en des fibrilles de faibles diamètres comme c'est le cas pour les fibres d'amiante mais peuvent se briser de manière transversale en segments de longueurs réduites. La composition chimique des FMA définit leur résistance chimique et leur solubilité alors que la conductivité thermique dépend du diamètre de la fibre ; un faible diamètre indiquant une faible conductivité thermique (RPA 2006, 2007)

Les FMA servent principalement à contrôler les pertes de chaleur, absorber l'énergie acoustique, filtrer les impuretés dans les gaz et les liquides, renforcer d'autres matériaux ou contrôler la condensation.

La figure 1 décline une arborescence représentant de manière générique la famille des fibres et ses nombreuses subdivisions.

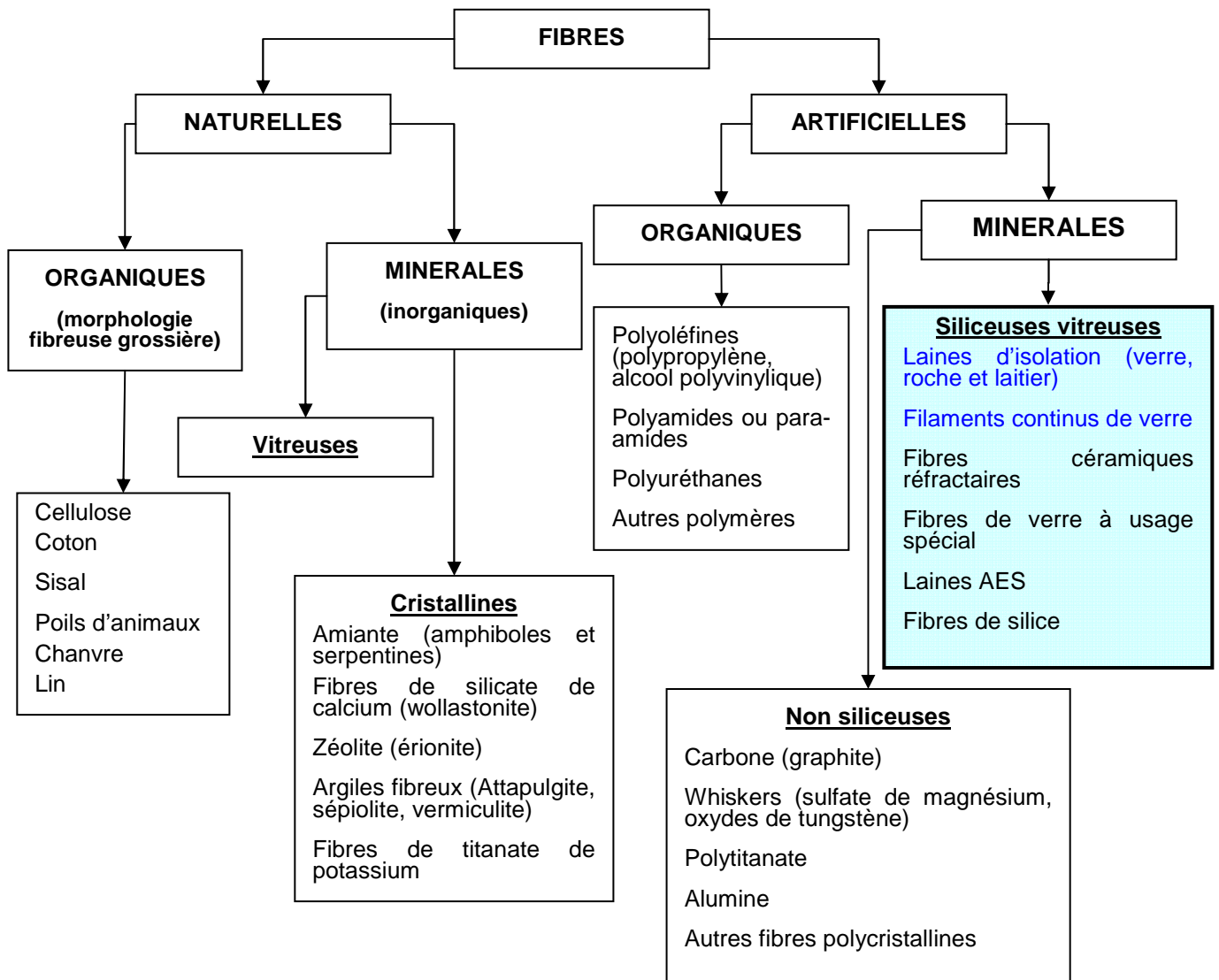


Figure 1: présentation générale de la famille des fibres (adaptée de TIMA, 1991)

Les FMA se définissent donc comme des silicates amorphes et inorganiques produits à partir de verre, de roche ou d'autres minéraux. Les diamètres moyens de ces fibres varient de 6 à 15 μm pour les filaments continus, 2 à 9 μm pour les laines minérales, 1,2 à 3,5 μm pour les FCR et de 0,1 à 3 μm pour les fibres de verre à usage spécial (Navy Environmental Health Center 1997).

Les filaments continus, les laines de verre et les fibres de verre à usage spécial sont produits uniquement à partir de verre, tandis que les autres laines minérales sont fabriquées à partir de roche ou de laitier.

2.2 Typologie utilisée pour les FMA

Il existe différentes manières de classer les fibres en s'appuyant sur leur origine, leur structure chimique, leur morphologie, leurs applications ou leurs méthodes de fabrication (Moore *et al.*, 2002). Elles ont toute été décrites dans le précédent rapport (Afsset, 2007)

A titre d'exemple, celle de l'OMS est présentée ci-dessous en figure 2. Cette organisation a classé les FMA en 4 catégories en s'appuyant sur le procédé de fabrication et les dimensions.

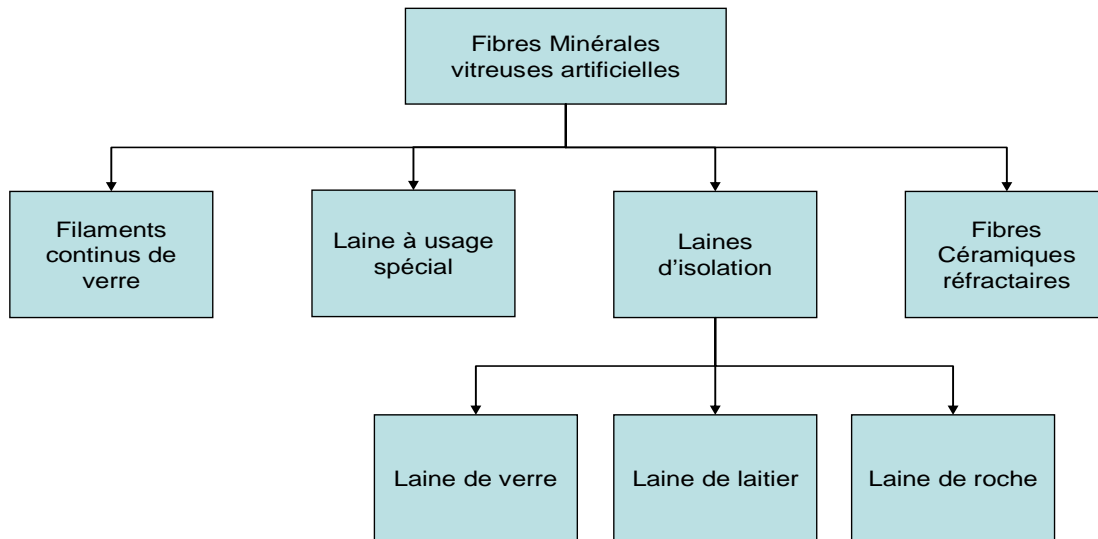


Figure 2: typologie des FMA par l'OMS (WHO, 1997)

2.3 Composition chimique des FMA

La composition chimique des FMA a été largement traitée dans le précédent rapport. Pour rappel, la figure 3 présente sous forme de diagramme la composition et le diamètre moyen des FMA.

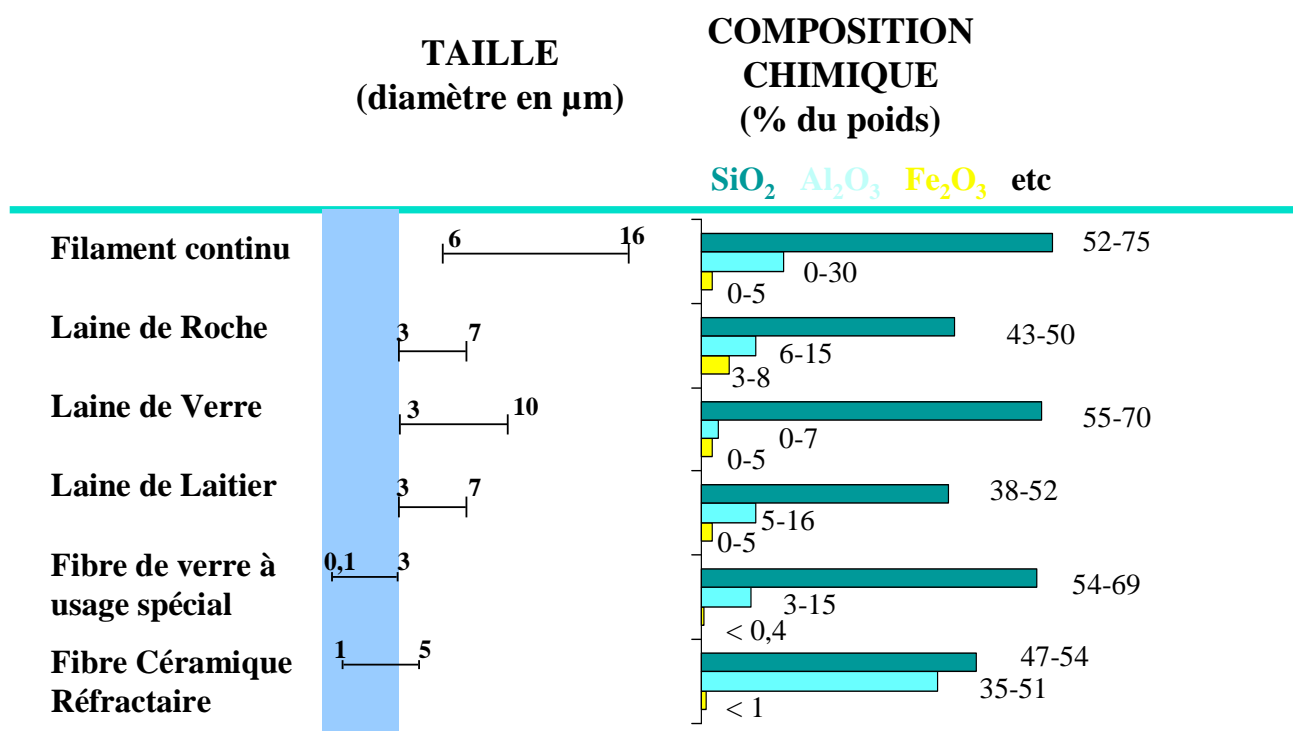


Figure 3: caractéristiques principales des FMA siliceuses vitreuses (adapté de De Vuyst P. et al. 1995, IARC 2002)

La composition chimique des fibres est un facteur pris en considération pour déterminer si les fibres siliceuses vitreuses doivent être soumises à une évaluation du potentiel cancérigène et permet notamment d'apprécier leur solubilité biologique. La commission européenne s'est appuyée sur le pourcentage pondéral d'alcalins et d'alcalino-terreux afin de classer les FMA vis-à-vis de leur potentiel cancérigène. L'indice, proposé par EURIMA (European Mineral Wool Manufacturers Association), se nomme indice KNB et correspond à la somme des oxydes alcalins et alcalino-terreux (exprimé en % de la masse).

$$\text{KNB} = [\text{Na}_2\text{O}] + [\text{K}_2\text{O}] + [\text{CaO}] + [\text{MgO}] + [\text{BaO}]$$

Ainsi, la valeur de l'indice KNB, critère de prédiction de solubilité, a été adoptée en 1997 par la commission des communautés européennes comme critère chimique pour le classement des FMA en cancérigène de classe 2 ou 3 (Directive 67/548/CEE 1967; Moore et al. 2002)

Les fibres qui intéressent ce rapport à savoir les laines minérales et les filaments continus de verre sont classés de la manière suivante :

L'Union Européenne classe les laines minérales en catégorie 3 des substances cancérigènes quand elles sont définies comme des fibres (de silicates) vitreuses artificielles

à orientation aléatoire, dont le pourcentage pondéral d'oxydes alcalins et d'oxydes alcalino-terreux ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}$) est supérieur à 18 %;

La classification en catégorie 3 des substances cancérogènes ne s'applique pas aux laines minérales qui remplissent l'une des conditions suivantes (note Q) :

- un essai de biopersistance à court terme par inhalation a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 μm ont une demi-vie pondérée inférieure à 10 jours ;
- un essai de biopersistance à court terme par instillation intratrachéale a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 μm ont une demi-vie pondérée inférieure à 40 jours ;
- un essai à long terme par inhalation, approprié, a conduit à une absence d'effets pathogènes significatifs ou de modifications néoplasiques ;
- un essai intra-péritonéal n'a pas montré d'excès de cancérogénicité ;

La note R précise que ne sont pas classées par rapport aux effets cancérogènes les fibres dont le diamètre moyen géométrique, pondéré par la longueur, moins deux erreurs types, est supérieur à 6 μm , ce qui exonère de facto de classification les filaments continus de verre.

Le CIRC en novembre 2001 a fait le communiqué suivant «... les laines minérales plus communément employées, comme les laines de verre d'isolation, la laine de roche et la laine de laitier sont à présent considérées comme ne pouvant être classées quant à leur cancérogénicité pour l'homme (Groupe 3). Les filaments de verre continus, principalement utilisés dans le renforcement des matières plastiques, sont également considérés comme ne pouvant être classés quant à leur cancérogénicité pour l'homme »

La chimie des laines d'isolation

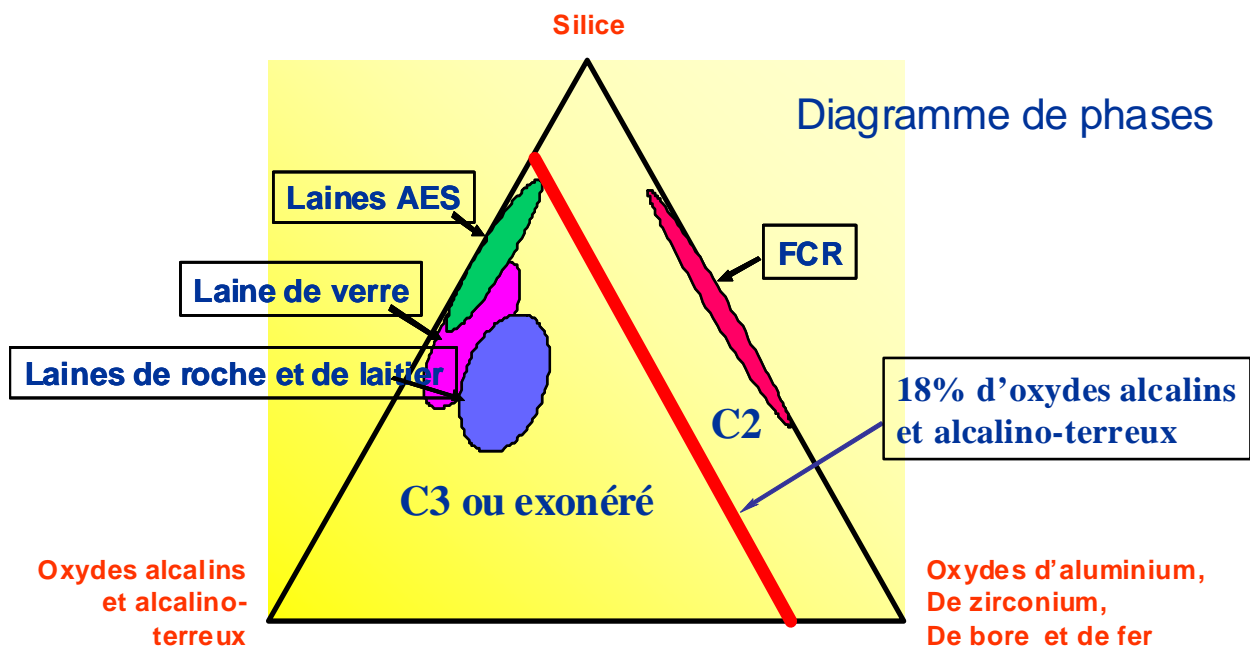


Figure 4: lien entre la classification européenne et la composition chimique des FMA (ECFIA 2005)

La figure 4 établit le lien entre la classification réglementaire européenne des FMA (C2 indique cancérigène de catégorie 2 et C3, cancérigène de catégorie 3) et leurs compositions chimiques notamment le pourcentage pondéral d'alcalins et d'alcalino-terreux.

2.4 Propriétés physico-chimiques des FMA

A l'image de la composition chimique, les propriétés physico-chimiques des FMA influencent de manière certaine l'usage, la résistance et la toxicité. Le réseau sous forme de structure vitreuse caractérise les FMA, dépourvues de la régularité des matériaux cristallins. En raison de leur allongement axial extrême, la fracture de ces fibres s'opère en général transversalement, la longueur de la fibre étant ainsi réduite sans que le diamètre en soit affecté. Même lors des opérations de broyage ou de traitement ultrasonique, les FMA se cassent transversalement, formant des fragments particuliers.

A l'opposé, l'amiante chrysotile se compose de faisceaux courbes ou droits, réunissant des fibrilles très fines. Lors du broyage, les faisceaux se divisent longitudinalement en un grand nombre de fibrilles extrêmement fines.

Ainsi, le diamètre nominal des FMA reste constant et présente peu de variations au cours du temps. Au contraire, la caractérisation de la longueur n'apparaît pas pertinente et dépend du procédé de fabrication, de l'usage et peut varier avec le vieillissement.

Les caractéristiques prises en compte dans les comptages de fibres dans les filtrages d'air par microscopie optique à contraste de phase telles que définies dans la méthode OMS sont les suivantes: diamètre $\leq 3 \mu\text{m}$, $L \geq 5 \mu\text{m}$, $L/D \geq 3$. Notons que la résolution du microscope optique limite l'observation à des fibres de diamètre $\geq 0,25 \mu\text{m}$.

Commentaire du Groupe de travail

De manière générale une fibre est une particule dont le rapport (longueur sur diamètre) $L/D > 3$

La définition des fibres selon l'OMS les caractérise d'un point de vue réglementaire en introduisant deux critères supplémentaires :

Un diamètre $< 3 \mu\text{m}$ et une longueur $> 5 \mu\text{m}$. Les valeurs limites d'exposition professionnelle ne prennent en compte que ces fibres.

Le terme « fibre alvéolaire » utilisé dans ce rapport correspond au terme anglais « respirable fiber » et concerne les fibres de diamètre $< 3 \mu\text{m}$ (Cf. précisions ci dessous)⁵

⁵ La norme NF EN 481 définit trois fractions conventionnelles de l'aérosol :

La fraction inhalable : fraction massique des particules totales en suspension dans l'air inhalée par le nez et la bouche.

La fraction thoracique : fraction massique des particules inhalées pénétrant au-delà du larynx

La fraction alvéolaire : fraction massique des particules inhalées qui pénètrent dans les voies aériennes non ciliées.

3 Les laines minérales

3.1 Production et utilisation

3.1.1 Définition des laines minérales

Avant les années 1945-1950, l'isolation n'était pas réglementée et présentait une dimension artisanale et non industrielle. Les matériaux employés concernaient principalement la vermiculite expansée, le liège ou l'argile. Après la seconde guerre mondiale, les industriels ont développé l'isolation manufacturée de produits finis, notamment les laines minérales incluant la laine de verre, de roche et de laitier mais aussi les mousses ou plastiques alvéolaires organiques.

D'après la norme française NF B20-001, les laines minérales se définissent comme « un ensemble de fibres en matière minérale amorphe, de consistance laineuse et obtenues normalement à partir de laitier, de roche ou de verre ». Le terme « laine minérale » désigne toutes les fibres inorganiques non métalliques, définies par le numéro CAS N° 71888-51-2. Les laines de roche à haute teneur en alumine et faible teneur en silice qui ont progressivement substitué les laines de roche classiques se définissent par le numéro CAS N° 287922-11-6.

Les laines minérales sont des matériaux d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie qui regroupent donc les laines de verre, élaborées à partir de sable, les laines de roche à partir de basalte et les laines de laitier à partir de scories de hauts-fourneaux (elles sont souvent assimilées aux laines de roche). Par conséquent, les laines minérales manufacturées sont dénommées en fonction du matériau utilisé pour leur fabrication. Elles existent sous différentes formes revêtues ou non : panneaux rigides, panneaux ou rouleaux semi-rigides, rouleaux souples, flocons, coquilles. Elles représentent 75 % des matériaux d'isolation utilisés en France (FILMM 2007).

Aux Etats-Unis, le terme de laines minérales inclut généralement la laine de roche et la laine de laitier mais exclut la catégorie des laines de verre. En Europe, le terme définit les trois types de laines évoquées précédemment.

C'est à partir de certaines éruptions volcaniques des îles du Pacifique Sud, donnant lieu à des dépôts de « flocons » de roche sur le sol et les arbres, que les habitants de ces îles eurent l'idée de s'en servir pour protéger leurs maisons. Plus près de nous, dès la plus haute antiquité, Phéniciens et Egyptiens savaient obtenir des fils de verre en plongeant une baguette métallique dans un creuset contenant du verre en fusion et en la retirant rapidement.

La première communication officielle sur la fibre de verre date du XVIII^{ème} siècle. L'auteur en est le physicien et naturaliste René-Antoine Ferchault de Réaumur (1713). Plus tard aux environs de 1880, apparurent les premières fibres industrielles réalisées à partir d'une matière minérale, des scories de hauts fourneaux.

Jusqu'au XX^{ème} siècle, la fibre de verre demeura cependant une curiosité. Puis, en quelques années, les précurseurs de l'industrie de l'isolation, parvinrent à simuler industriellement l'éruption volcanique et à liquéfier la roche pour lui conférer les propriétés isolantes de la laine. D'autres, à partir de l'écoulement d'un filet de verre fondu sur un jet de vapeur, réussirent à obtenir un « coton de verre », origine probable de son utilisation comme isolant thermique. Le développement accéléré des pays industrialisés a ensuite entraîné des besoins accrus de calorifugeages (FILMM 2007).

La fibre de verre, présentée pour la première fois lors de l'Exposition internationale de 1883, a tout d'abord été mise sur le marché au début des années 1930 en tant que filtre pour appareils de chauffage résidentiels et isolant de maison. La fibre de verre textile a été commercialisée vers la fin des années 1930 et la fibre de verre de faible diamètre, vers la fin des années 1940. La fibre de verre est produite dans une vaste gamme de compositions et de diamètres différents. Le terme «fibre de verre» comprend donc différents matériaux fabriqués pour diverses applications. Les deux types de fibre de verre de base sont les fibres de laine de verre et les filaments de verre continu (aussi appelés filaments de verre textile) (Inserm, 1999).

3.1.2 Modes de fabrication des laines minérales

3.1.2.1 Laine de verre

Pour la production de laine de verre, les matières premières de fine granulométrie se composent de sable, de verre recyclé ou « calcin », de calcaire, de dolomie, de borates, de carbonate de sodium, de carbonate de calcium, de sulfate de sodium, de nitrate de sodium...

L'usage de verre recyclé provenant de la récupération et du traitement des vitrages de bâtiments, des pare-brises automobiles ou des bouteilles, est en constante augmentation. Le verre recyclé représente aujourd'hui entre 30 et 60 % des matières premières intermédiaires. Dans certaines usines, ce pourcentage peut même atteindre 80 %. La composition verrière se présente sous forme de particules broyées avec une granulométrie rigoureusement définie. De plus, le dosage des composants est très précis pour constituer un mélange homogène dont la fusion sera ainsi optimale.

Les matières premières sont introduites puis fondues à 1250 °C / 1400 °C dans un four verrier fonctionnant soit au gaz, soit à l'électricité. Le verre formé dans le four circule ensuite dans un canal couramment nommé « feeder » permettant de maintenir un mélange de verre homogène à 1100 °C avant de s'écouler par un orifice dans l'assiette de fibrage. Les assiettes sont des couronnes métalliques percées de très nombreux trous et animées d'un mouvement de rotation rapide.

Les fibres résultent du passage du verre au travers des petits orifices latéraux de l'assiette animée d'un mouvement de rotation extrêmement rapide. Après ce premier étirage horizontal par centrifugation, le fibrage se finalise par un étirage vertical sous l'action thermique et mécanique d'une couronne de brûleurs soufflant de l'air chaud (FILMM 2007). Les fibres sont refroidies avec de l'air avant d'être pulvérisées par un liant destiné à l'encollage des fibres entre elles. La projection de liant implique en général une résine phénolique avec une huile minérale (3 classes incluant des émulsions aqueuses d'huiles minérales, des huiles minérales simples, du polypropylène glycol ou des composés apparentés) (TIMA 1991). D'autres ajouts à la formulation peuvent être faits, notamment les résines mélamine, les silicones, les agents antistatiques, les agents mouillants ou les stabilisants (Inserm, 1999). Le FILMM souligne que le liant, à l'heure actuelle pour la production en France, se limite en général à une résine phénolique avec divers additifs tels que l'urée, une huile minérale, de la silicone et des agents antistatiques.

La figure 5 illustre le procédé rotatif employé par les producteurs de laines de verre.

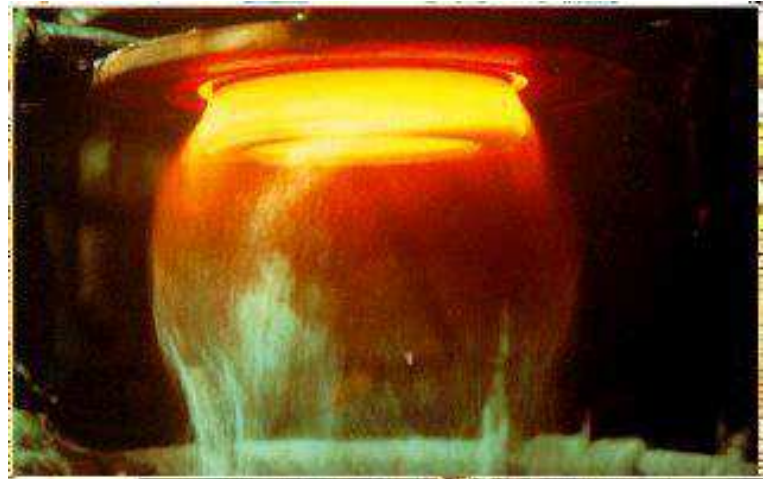
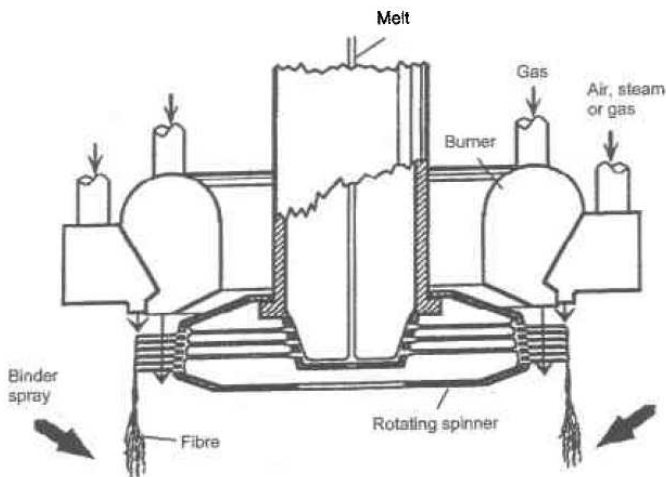


Figure 5: procédé rotatif employé pour la production de laines de verre (IARC, 2002 ; FILMM, 2007)

Les caractéristiques des fibres dépendent explicitement de la composition, de la vitesse de rotation, de la température du mélange, du débit et de la viscosité du verre, de la dimension de l'assiette mais aussi du nombre et du diamètre des trous et enfin du régime des brûleurs.

Les fibres sont ensuite collectées par aspiration sur un tapis afin de former un matelas de laine. Le matelas de laine de verre trouve son épaisseur définitive au cours du passage dans une étuve, à environ 250°C, où le liant polymérisé (FILMM, 2007).

La laine de verre est alors découpée en largeur et en longueur à la dimension requise au moyen de scies ou de massicots et peut se présenter sous forme de rouleaux ou panneaux, selon l'usage final visé. Les chutes de rives ainsi générées sont recyclées dans le procédé de fabrication.

Dans la zone de finition de la ligne de production, des machines opèrent l'adjonction de revêtements et certains parachèvements spécifiques (revêtements collés ou cousus en surface avant le conditionnement). Certains produits d'ensimage⁶ sont ajoutés afin de promouvoir l'adhésion entre les fibres et la matrice pour les applications de renforcement. Ces agents incluent notamment des mélanges de chlorure de chrome et d'acétate de polyvinyle, de silane et d'acétate de polyvinyle et de silane époxy (Navy Environmental Health Center, 1997). Le FILMM indique que ces agents ne concernent pas la production française actuelle des laines minérales d'isolation.

Avant emballage, les produits en rouleaux ou panneaux sont fortement comprimés, profitant ainsi des avantages d'élasticité et de reprise d'épaisseur du matériau. Ceci peut réduire jusqu'à près de 10 fois le volume du produit dans son emballage rendant plus aisée et économique sa manipulation, son stockage et son transport vers la destination finale.

Les colis unitaires sont ensuite très fréquemment regroupés en unités palettisées facilitant les opérations logistiques de stockage et transport (site (EURIMA 2008).

⁶ Liants

La figure 6 illustre schématiquement la ligne de production d'une laine de verre.

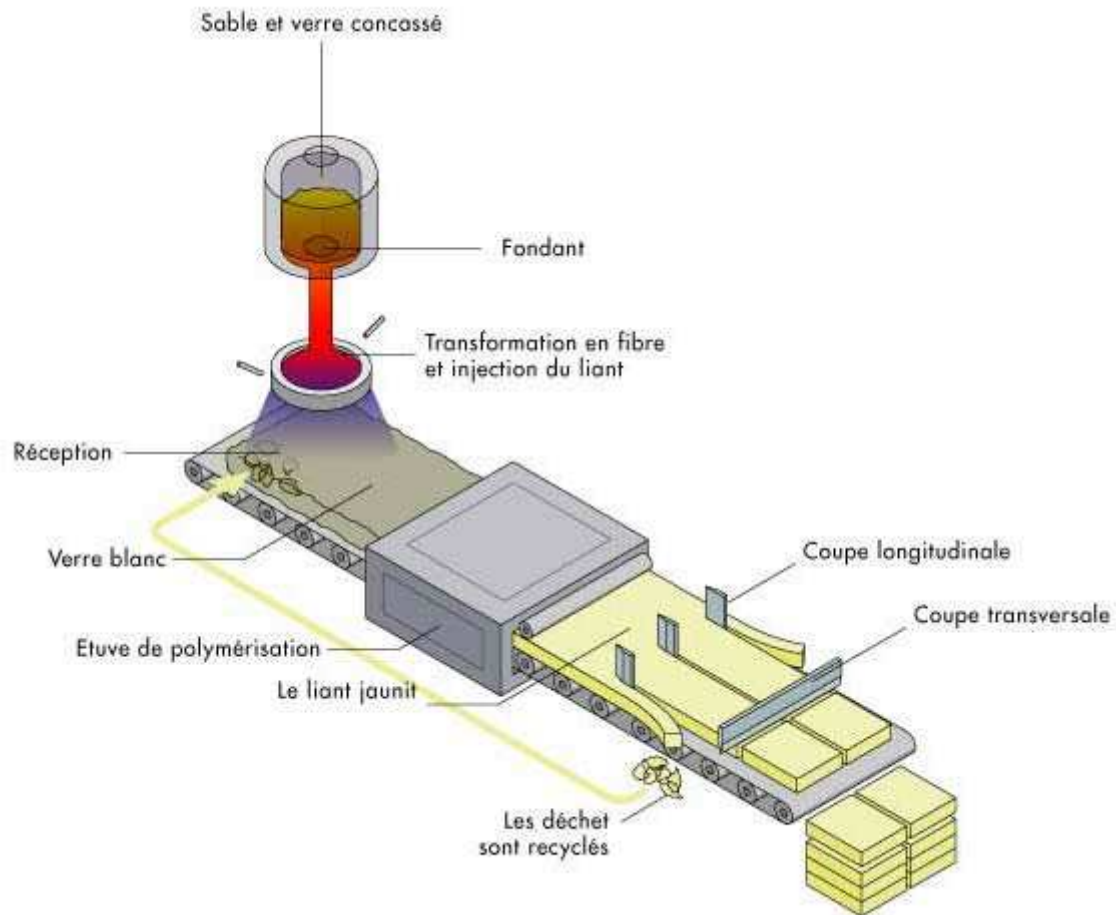


Figure 6: ligne de production d'une laine de verre (FILMM, 2007)

3.1.2.2 Laine de roche et laine de laitier

Les laines de roche et de laitier se composent principalement de silicates d'aluminium et de calcium. Ces laines sont plus enrichies en oxydes métalliques alcalino-terreux (Ca, Fe, Mg, Ti) et appauvries en oxydes métalliques alcalins (K, Na) (Navy Environmental Health Center, 1997).

Pour la production de laine de roche, les matières premières diffèrent et se composent notamment de roches basaltiques. On emploie une roche alumino-siliceuse, habituellement du basalte (enrichi ou non avec du laitier de haut-fourneau), du carbonate de calcium ou de la dolomite, chargés en alternance avec des couches de coke dans un four. Les roches naturelles se composent de 40 à 60 % de carbonate de calcium et de magnésium (EURIMA 2008;NIOSH 1994) . L'inclusion de coke et de fondants facilitent la fusion dans le cubilot à 1 500 °C.

La laine de laitier est produite en recyclant les déchets de certains hauts fourneaux. Naturellement, la composition du produit final varie explicitement avec le contenu métallique du laitier original. Les laines de laitier sont généralement appauvries en sodium (Navy Environmental Health Center, 1997). Dans les hauts fourneaux, le fer est extrait du minerai en excluant le laitier, sous-produit métallurgique formé en cours de fusion et matière

première destinée à la production de laine de laitier. L'étape d'extraction du fer est contrôlée afin de garantir une quantité maximale de fer pour un coût réduit. L'une des conséquences de cette situation réside dans le fait que la composition chimique du laitier peut varier quotidiennement. En raison de cette fluctuation, la composition est ajustée par des additifs afin de produire un mélange dont la composition garantira un produit uniforme. Les additifs influencent la viscosité et la tension de surface du mélange destiné à la production de laines de laitier (TIMA, 1991).

Le mélange est fondu généralement dans un cubilot utilisant de l'air enrichi d'oxygène. Le mélange fondu s'écoule par le fond; il contient des ions ferriques et ferreux provenant du laitier. Dans les conditions de fusion réductrice, la plupart des ions ferriques et ferreux sont réduits en fer métallique, qui tombe au fond et sera régulièrement prélevé, pour éviter d'endommager les trous des filières. Il reste malgré tout, toujours, une quantité notable de fer sous forme d'oxydes. Le mélange peut aussi être obtenu par fusion électrique.

Le mélange fondu, est ensuite versé sur des roues (*spinning wheel*) tournant à grande vitesse qui projettent des fibres entraînées par un courant d'air. Le réglage des rotations fournit des variétés de fibres définies selon les besoins ultérieurs. Une projection de liant à base de résines phénoliques est réalisée de manière concomitante. Les émissions provenant des cheminées du site peuvent contenir du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote (Inserm, 1999).

La figure 7 illustre le procédé rotatif employé par les producteurs de laines de roche et de laitier.

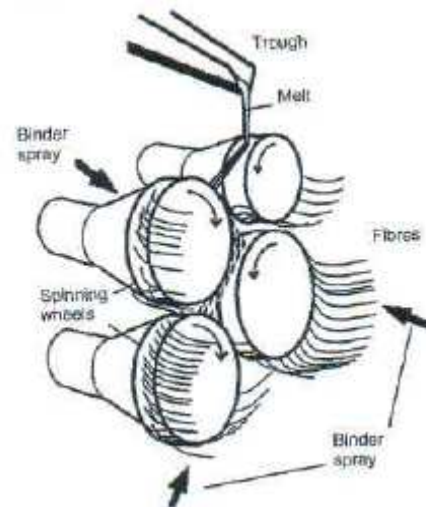


Figure 7: procédé rotatif employé pour la production de laines de roche (IARC, 2002 ; FILMM, 2007)

Une partie de la matière est "infibrée" sous forme de nodules de roche. On ajoute des produits de collage ainsi que des éléments spécifiques à chaque usage puis le liant polymérise et le matelas de laine est calendré avant l'emballage (FILMM, 2007).

Différents facteurs permettent d'agir sur la dimension des fibres obtenues, incluant notamment la composition, la température et la viscosité du mélange mais aussi la géométrie et la vitesse des rotors.

Les étapes aval s'apparentent à celles identifiées pour la production de laine de verre.

Les fibres sont refroidies par soufflage et après pulvérisation d'un liant (encollage), elles sont collectées par aspiration sur un tapis pour former un matelas de laine.

Les caractéristiques dimensionnelles et pondérales des produits finis sont ajustées au travers de réglage et de découpes réalisées sur la ligne. Les produits sont enfin conditionnés avant l'expédition (FILMM, 2007).

La figure 8 illustre schématiquement la ligne de production d'une laine de roche ou de laitier.

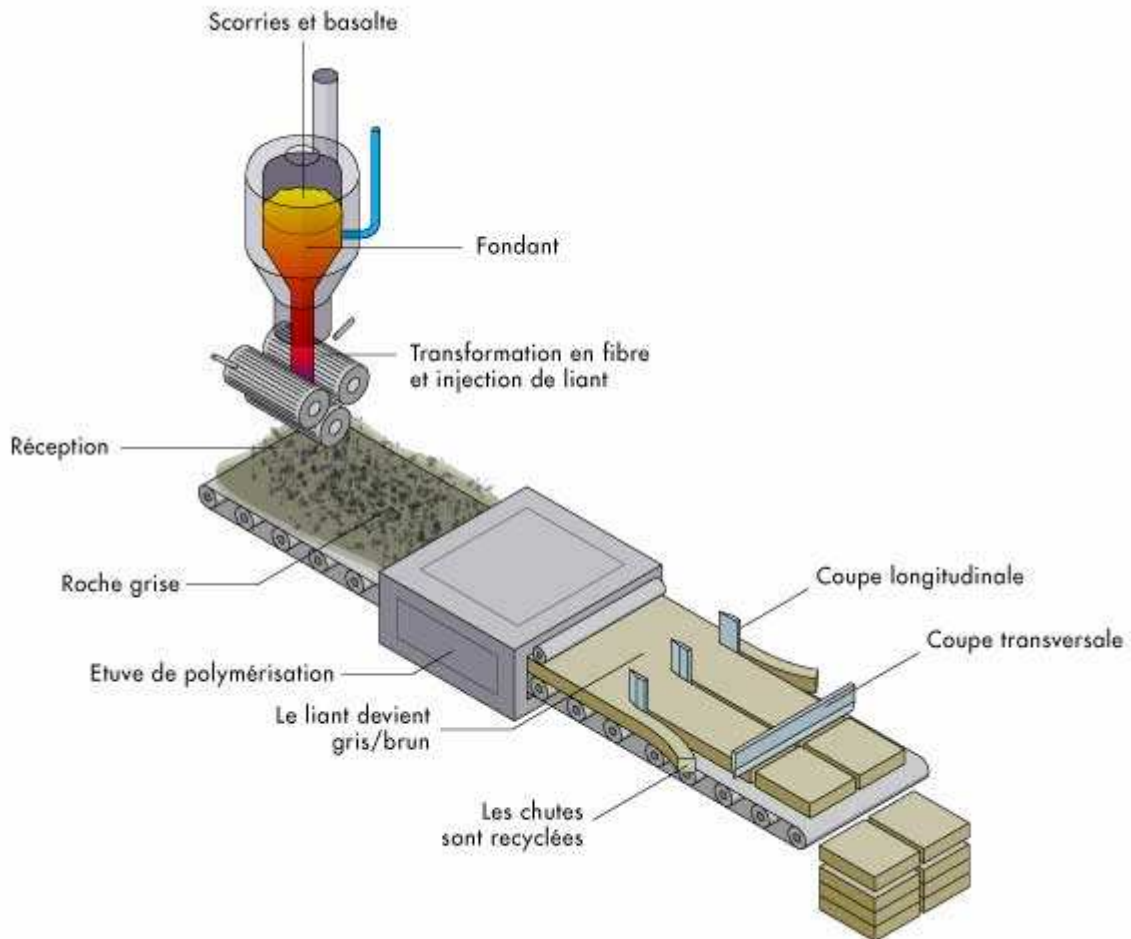


Figure 8: ligne de production d'une laine de roche ou de laitier (FILMM, 2007)

La figure 9 illustre synthétiquement les deux procédés de production relatifs aux laines de verre, de roche et de laitier.

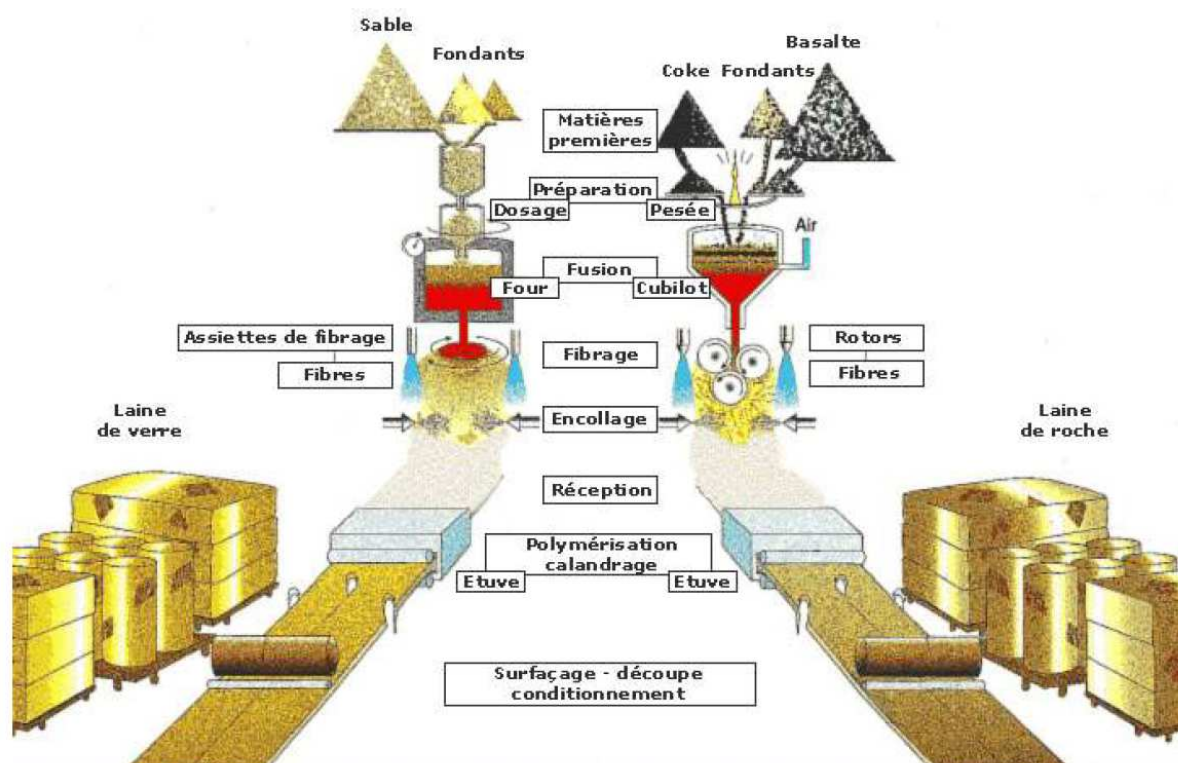


Figure 9: modes de fabrication des laines minérales (FILMM, 2007)

3.1.3 La composition des laines minérales

Jusqu'à dans les années 1980, les modifications liées à la composition ont été corrélées aux exigences imposées en raison du procédé de fabrication par rotation et la disponibilité des matières premières (Baan and Grosse 2004, EURIMA 2008;TIMA 1991). En effet, les caractéristiques techniques du procédé par rotation requièrent une faible température de formation. Pour cette raison, le verre incorpore davantage d'oxydes alcalins (Na_2O et K_2O), d'oxyde borique (B_2O_3) et moins d'oxydes alcalino-terreux (CaO et MgO). La composition de la laine de verre résultait alors d'un consensus entre la nécessité d'une faible température et une résistance adéquate.

La silice (SiO_2) reste le principal constituant et représente entre 40 % et 70 % de la plupart des FMA (TIMA, 1991). Les compositions peuvent varier, en partie selon les caractéristiques que doit présenter le produit final. Les stabilisateurs accroissent la résistance chimique et thermique des fibres, tandis que les agents fondants en diminuent la ténacité (TIMA, 1991).

3.1.3.1 Laine de verre

En principe, divers composés chimiques peuvent entrer dans la composition du verre. Cependant, dans la formulation du verre utilisé, le nombre d'oxydes est limité en raison de leur coût. La silice reste la matière principale mais le procédé de fabrication nécessite l'ajout d'oxydes intermédiaires ou agents fondants, nécessaires pour ajuster la composition.

Les intermédiaires ou éléments stabilisateurs comprennent notamment l'oxyde d'aluminium ou alumine, le dioxyde de titane, le titane et l'oxyde de zinc tandis que les éléments modificateurs incluent entre autre l'oxyde de magnésium, l'oxyde de lithium, la lithine, l'oxyde de baryum, l'oxyde de calcium, l'oxyde de sodium, l'hydroxyde de sodium et l'oxyde de potassium (IARC, 2002 ; TIMA, 1991). Le FILMM indique qu'à l'heure actuelle, le dioxyde de titane, le titane, l'oxyde de zinc et la lithine ne sont pas employés en France pour la production de laine de verre.

Les oxydes intermédiaires permettent d'accroître la résistance chimique d'un verre de silicate et contrôlent, avec les oxydes modificateurs, le caractère visqueux du mélange qui s'avère déterminant pour l'étape de fibrage (IARC, 2002 ; TIMA, 1991). Les laines de verre renferment d'infimes quantités de stabilisateurs (de 0 à 7 %; surtout Al_2O_3) et des quantités notables de fondants (de 18 à 42 %; surtout Na_2O et CaO).

3.1.3.2 Laine de roche et laine de laitier

Les laines de roche actuelles et les laines de laitier se composent de verre de silicates d'aluminium, de magnésium et de calcium. Pour la fabrication de laine de laitier ou de laine de roche, respectivement le laitier issu de hauts fourneaux ou le basalte, représentent la matière première principale et les autres composants permettent de compléter et d'équilibrer la composition finale du mélange. A titre d'exemple, si la matière première est trop riche en oxydes acides comme la silice, du calcaire ou un laitier riche en oxyde de calcium est ajouté (IARC 2002).

Au début des années 1990, les producteurs, sensibilisés à un éventuel risque sanitaire lié aux fibres en suspension pouvant être émis par les matériaux, ont modifié la composition chimique afin d'accroître leur solubilité dans les tissus biologiques (Baan and Grosse, 2004). Ainsi, les compositions chimiques des laines minérales ont continué d'évoluer pour correspondre aux dispositions arrêtées par l'adoption de la directive européenne 97/69/CE (Directive 97/69/CEE 1997) afin de satisfaire aux critères d'exonération du classement cancérigène (introduction de l'indice KNB et des tests de biopersistance).

Ainsi, la teneur en alumine des laines de verre a été diminuée, permettant à la fibre de se dissoudre plus rapidement dans le liquide pulmonaire des alvéoles à pH neutre.

A l'inverse, pour les laines de roche, la teneur en alumine a été augmentée et la teneur en silice a été diminuée. Effectivement, une diminution de la teneur en alumine aurait rendu semblable la composition des laines de roche avec celle des laines de verre. Ainsi, l'augmentation de la teneur permet une dissolution plus rapide des fibres dans les macrophages à pH 4 (FILMM, 2007). L'Inserm note que les formes les plus récentes sont plus solubles et moins biopersistantes (Inserm, 1999).

La laine de roche à haute teneur en alumine a été introduite progressivement au cours des années 1990, notamment en raison de la directive européenne et la nécessité de modifier la composition. Depuis 1996-1998, elle constitue l'unique représentante des laines de roche. Les modifications restent limitées et concernent 1 à 2 % pour le taux d'alumine.

Le tableau 1 illustre les divergences selon les sources ou tout du moins la variabilité des intervalles et souligne l'évolution des compositions au regard des techniques de production et de la réglementation, en l'occurrence la directive 97/69/CE. Les colonnes nuancées en bleu sont les plus actuelles pour la production de laines minérales en France.

Tableau 1: compositions des laines minérales (IARC, 2002 ; FILMM, 2007 ; Inserm, 1999 ; TIMA, 1991)

| | Laine de verre 1, 3 | Laine de verre 2 | Laine de roche 1 | Laine de roche 2 | Laine de roche 3 | Laine de roche à partir de basalte fondue dans un four 4 | Laine de roche à partir de basalte et autres matériaux Fondus en « cupola » 4 | Laine de roche haute teneur en alumine et faible teneur en silice 2 | Laine de laitier 1 | Laine de laitier 2 | Laine de laitier 3 | Laine de laitier à partir de laitier fondu en « cupola » 4 |
|---------------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--|---|---|--------------------|--------------------|--------------------|--|
| SiO ₂ | 63 - 67 | 55 - 70 | 38 - 48 | 43 - 50 | 33 - 43 | 45 - 58 | 41-53 | 33 - 43 | 37 - 45 | 38 - 52 | 37 - 42 | 38 - 52 |
| Al ₂ O ₃ | 1 - 4 | 0 - 7 | 10 - 24 | 6 - 15 | 18 - 24 | 12 - 13,5 | 6-14 | 18 - 24 | 10 - 12 | 5 - 16 | 17 - 20 | 5 - 15 |
| Fe ₂ O ₃ ou FeO | 0 - 1 | 0-5 | 2 - 11 | --- | 3 - 9 | 11 - 12 | 3-8 | 3 - 8 | 0 - 1 | 0 - 5 | 1 - 2 | 0 - 2 |
| CaO | 9 - 12 | 5 - 13 | 20 - 40 | 10 - 25 | 23 - 33 | 10 - 12 | 10-25 | 23 - 33 | 40 - 48 | 20 - 43 | 37 - 39 | 20 - 53 |
| MgO | | 0 - 5 | | 6 - 16 | | 8 - 10 | 6-16 | | | 4 - 14 | | 4 - 14 |
| Na ₂ O | 15 - 19 | 13 - 18 | 1 - 3 | 1 - 3,5 | 1 - 10 | 2,5 - 3,3 | 1,1-3,5 | 1 - 10 | 0 - 1 | 0 - 1 | 1 - 2 | 0 - 1 |
| K ₂ O | | 0 - 2,5 | | 0,5 - 2 | | 0,8 - 2 | 0,5-2 | | | 0,3 - 2 | | 0,3 - 2 |
| B ₂ O ₃ | 2 - 6 | 0 - 12 | | < 1 | | | | | | < 1 | | |
| BaO | | 0 - 3 | | | | | | | | | | |
| TiO ₂ | | 0-0,5 | | 0,5 - 3,5 | | 2,5 - 3 | 0,9 - 3,5 | 0,5 - 3 | | 0,3 - 1 | | 0,3 - 1 |
| F ₂ | | 0 - 1,5 | | --- | | | | | | --- | | |
| S | | | | | | 0 - 0,2 | 0 - 0,2 | | | 0 - 2 | | 0 - 2 |
| P ₂ O ₅ | | | | < 1 | | | | | | 0 - 0,5 | | |
| SO ₃ | | 0 - 0,5 | | | | | | | | | | |
| Li ₂ O | | 0 - 0,5 | | | | | | | | | | |

1 FILMM, 2002 ; 2 IARC, 2002; 3 FILMM, 2007; 4 Inserm, 1999; TIMA, 1991.

3.1.4 Propriétés physico-chimiques

La densité, la longueur et le diamètre des fibres sont les propriétés critiques qui déterminent le comportement aérodynamique et le caractère alvéolaire⁷ des FMA. Les propriétés physiques définies pour les composés organiques ne sont généralement pas applicables aux matériaux inorganiques comme les FMA.

De même, le point de fusion se définit souvent par un intervalle de températures. Les experts préfèrent s'appuyer sur le terme de « point de ramollissement » défini comme la température de changement d'état de la fibre.

Les propriétés physiques varient selon la nature des matières premières et les spécifications de production ; cependant le tableau 2 présente des valeurs représentatives et génériques pour les laines minérales.

Tableau 2: propriétés physiques suivant le type de FMA (TIMA, 1991 ; ATSDR, 2004 ; Inserm, 1999)

| | <i>Laine de verre</i> | <i>Laine de laitier</i> | <i>Laine de roche</i> |
|--|---|-------------------------|-----------------------|
| <i>Température maximale d'utilisation (°C)</i> | 450 – 550 | 750 | 750 |
| <i>Point de ramollissement (°C)</i> | 650 – 700 | 760 – 870 | 760 – 870 |
| <i>Indice de réfraction</i> | 1,51 – 1,54 | 1,6 – 1,8 | 1,6 – 1,8 |
| <i>Densité (g.cm-3):</i> | 2,4 – 2,55 | 2,7 – 2,9 | 2,7 – 2,9 |
| <i>Constante diélectrique à 1 MHz</i> | - | - | - |
| <i>Module d'élasticité (GPa):</i> | 55 – 62 | 48 – 76 | 55 – 62 |
| <i>Particules non fibreuses ou Shot (pourcentage pondéral)</i> | Traces | 30 – 50 | 20 – 50 |
| <i>Température de dévitrification</i> | 1 000 | 825 – 950 | 725 – 900 |
| <i>Force de tension (MPa)</i> | Pas de données | 482 – 689 | 482 – 689 |
| | <i>Résistance chimique dans l'eau, les acides et les alcalins</i> | | |

Les FMA restent relativement stables au cours du temps mais peuvent toutefois se briser dans des milieux très acides ou très alcalins (ATSDR, 2004). De même, les fibres minérales vitreuses sont non cristallines et restent vitreuses quand elles sont utilisées à des températures inférieures ou équivalentes à leur point de ramollissement. A des températures plus élevées, elles s'écoulent ou fondent selon leur composition (IARC, 2002).

⁷ De manière générale une fibre est une particule dont le rapport (longueur sur diamètre) L/D>3. La définition des fibres selon l'OMS se caractérise d'un point de vue réglementaire en introduisant deux critères supplémentaires. Un diamètre <3µm et une longueur >5µm. Les valeurs limites d'exposition professionnelle ne prennent en compte que ces fibres. Le terme « fibre alvéolaire » utilisé dans ce rapport correspond au terme anglais « respirable fiber » et concerne les fibres de diamètre < 3 µm

La laine de verre ne brûle pas, ne pourrit pas et n'absorbe ni l'humidité ni les odeurs. Des tests réalisés selon la norme American Society for Testing and Materials (ASTM) ont démontré que la fibre de verre elle-même ne favorisait pas la croissance de moisissures ou de bactéries. Cependant, des moisissures ou des bactéries peuvent proliférer dans tout matériau souillé ou demeurant mouillé pendant de longues périodes (Inserm, 1999).

3.1.5 Le diamètre

Le tableau 3 présente une revue historique liée à la production des FMA. L'évolution générale concernant les diamètres moyens des laines d'isolation est réelle. Cependant, De Vuyst *et al.* (1995) soulignent que les fibres définies par un très faible diamètre étaient déjà présentes dans certains produits manufacturés dans les années 1900. L'analyse d'une laine de laitier particulière datant de 1928 et analysée par (Klingholz 1977) révèle une proportion de 60 % de fibres avec un diamètre inférieur à 3 µm. Suite aux évolutions de production des FMA, depuis 1930, le diamètre nominal moyen a diminué au cours des années. Cette diminution s'explique notamment par la réduction importante du diamètre des fibres définies par un diamètre élevé, sans modification du pourcentage de fibres de faibles diamètres. Les fibres grossières devenaient indésirables en raison de leurs performances techniques médiocres, un poids supérieur et semblaient responsables de la plupart des irritations causées par ces fibres (Dodgson *et al.* 1980; Dodgson, Cherrie, and Groat 1987, Hodgson and Darnton 2000).

La nécessité d'inflexion du diamètre des laines d'isolation s'explique notamment par le fait que le coefficient d'isolation thermique et acoustique augmente lorsque le diamètre diminue. La phase technologique initiale de production a été caractérisée par un procédé de production discontinu et l'absence d'agents anti-poussières. La production contemporaine des laines minérales s'apparente à un procédé continu et inclut des agents limitant la poussière. La transition s'est déroulée site par site en raison de l'évolution des techniques de fabrication (De Vuyst *et al.* 1995).

La tendance reste donc à une diminution continue du diamètre des laines minérales jusqu'au point d'équilibre sans pour autant affaiblir leurs propriétés mécaniques.

Tableau 3: revue historique concernant la production des FMA (De Vuyst *et al.*, 1995)

| <i>dates</i> | <i>Faits historiques</i> | <i>Evolution du diamètre moyen des laines d'isolation</i> | <i>Phase technologique</i> |
|--------------|--|---|----------------------------|
| 1885 | <i>Première production industrielle de laines de laitier (Royaume-Uni)</i> | 30 µm | Initiale |
| 1897 | <i>Première production de laines de roche (Etats-Unis)</i> | | |
| Années 1930 | <i>Production industrielle de laines de verre (Etats-Unis)</i> <i>Introduction des agents anti-poussières</i> | | |
| Années 1950 | <i>Diminution progressive du diamètre des fibres</i> | 4 à 6 µm | Intermédiaire |
| Années 1970 | <i>Métrologie des concentrations de fibres en suspension sur les sites de production</i> | | Actuelle |

Il a été fait état d'études portant sur la mesure du diamètre récemment réalisées sur des échantillons de produits de laine de roche remontant à plusieurs années. Les laines les plus anciennes contenaient plus de fibres avec un diamètre élevé et plus de particules non fibreuses. La répartition a réellement connu une réduction imputable à des améliorations techniques. Le diamètre moyen des fibres a ainsi diminué de 30 µm dans les années 1930 pour atteindre entre 2 et 8 µm à l'heure actuelle. En revanche, il semble que la répartition des fibres en suspension, dans la laine de roche comme dans la laine de verre, est restée à peu près constante au cours des années.

La suite du paragraphe décrit les diamètres recensés dans la littérature internationale pour les laines minérales. De manière analogue à la caractérisation relative aux dimensions des FCR (Afsset, 2007), les sources sont multiples et indiquent des résultats divergents concernant les diamètres. Les différents spectres granulométriques s'expliquent par diverses raisons, notamment la nature de l'échantillon étudié (fibres en sortie de production, dans le matériau, après usinage ou en suspension dans l'atmosphère de travail), la méthode d'analyse retenue (MOCP, META ou MEBA) et le paramètre utilisé afin de définir le diamètre (diamètre géométrique, arithmétique, pondéré ou non par la longueur..).

Le tableau 4 présente, pour certains échantillons de fibres collectées, les moyennes arithmétiques et géométriques des diamètres selon le type de fibres et le type de microscopie retenu pour la mesure des dimensions.

Selon le rapport de l'ATSDR (2004), la production de laines minérales incluant la laine de verre, de roche et de laitier aboutit à la production de diamètres entre 3 et 7 µm pour les laines de roche et les laines de laitier et entre 3 et 15 µm pour les laines de verre classiques.

Tableau 4: mesure du diamètre des fibres de laine de verre, de laine de laitier et de laine de roche (ATSDR, 2004)

| Type et nombre (N) de produits étudiés | Moyennes arithmétiques des diamètres (µm) : LM | Moyennes géométriques des diamètres (µm) : LM | Moyennes arithmétiques des diamètres (µm) : SEM | Moyennes géométriques des diamètres (µm) : SEM |
|--|--|---|---|--|
| Laine de verre | | | | |
| N = 9 | 2.4–8.1 | 1.7–6.6 | 1.2–7.7 | 0.8–6.3 |
| Laine (roche/laitier) | | | | |
| N = 9 | 2.5–4.7 | 1.7–3.3 | 2.4–5.3 | 1.7–4.0 |

LM : light microscopy (microscopie optique)

SEM : scanning electron microscopy (MEBA)

Pour les laines de verre, l'expertise collective Inserm (1999) évoque un diamètre moyen établi par les fabricants s'élevant, par microscope optique, entre 2,4 et 8,1 µm et, par microscope électronique, entre 3,3 et 7,9 µm.

Le rapport de la Navy rapporte un diamètre moyen entre 3 et 7 µm pour la laine de verre (intervalle de 3 à 15 µm). (Christensen et al. 1993) ont mesuré la distribution des diamètres de 22 échantillons de FMA siliceuses provenant de 11 producteurs distincts. Les échantillons incluaient 9 laines de verre avec par MOCP, un diamètre moyen arithmétique entre 2,4 et 8,1 µm, un diamètre moyen géométrique entre 1,7 et 6,6 µm ; et par MEBA, un diamètre moyen

arithmétique entre 1,2 et 7,7 μm et un diamètre moyen géométrique entre 0,8 et 6,3 μm . De même, les auteurs ont mesuré la distribution de 9 échantillons de laines de roche et de laines de laitier avec par MOCP, un diamètre moyen arithmétique entre 2,5 et 4,7 μm , un diamètre moyen géométrique entre 1,7 et 3,3 μm ; et par MEBA, un diamètre moyen arithmétique entre 2,4 et 5,3 μm et un diamètre moyen géométrique entre 1,7 et 3,3 μm .

D'après la TIMA (1991), les laines de verre présentent un diamètre moyen compris entre 1 et 10 μm .

Les laines minérales en sortie de production présentent usuellement un diamètre entre 3 et 6 μm (Fitzer E, Kleinholz R, and Tiesler H 1988). La production aboutit à la formation de laines de roche et de laines de laitier avec un diamètre moyen s'établissant entre 2 μm et 6 μm . La longueur reste virtuellement difficile à mesurer étant donné que les fibres se brisent dès lors qu'elles sont extraites de la masse de fibres (TIMA, 1991).

Dans un rapport rédigé conjointement par Eurima, l'ECFIA et l'APFE (EURIMA, ECFIA, and APFE 1991) les auteurs définissent les laines minérales d'isolation comme des FMA définies par une somme pondérale d'oxydes alcalins et d'oxydes alcalino-terreux supérieure à 18 %, plus de 1 % en poids de fibres avec un diamètre inférieur à 3 μm et moins de 1 % en poids de fibres inférieur à 1 μm . La valeur moyenne arithmétique du diamètre s'établit toujours selon les mêmes auteurs entre 8 et 9 μm avec un écart-type défini entre 2 et 5 μm .

De Vuyst *et al.* (2000) rapportent des diamètres s'établissant entre 4 et 6 μm pour les laines de verre et les laines de roche ; et entre 3 et 8 μm pour les laines de laitier (De Vuyst P, Brochard P., and Pairon JC. 2000).

La monographie de l'IARC (2002) propose pour les laines de verre, de roche et de laitier, dans les tableaux 5 et 6, une distribution de diamètres moyens associant également le pourcentage pondéral de particules.

Tableau 5: diamètre des fibres de laine de roche et de laitier (IARC, 2002)

| PRODUIT | DIAMÈTRE DES FIBRES (µM) | | PARTICULES (POURCENTAGE PAR POIDS) |
|--|--------------------------|--------------------|--|
| | MOYENNE | DÉVIATION STANDARD | |
| LAINE DE ROCHE ET LAINE DE LAITIER (LOTS ALÉATOIRES) | 5,3 | 3,8 | 16 |
| | 4,5 | 4,1 | 49 |
| | 4,4 | 2,7 | 43 |
| | 4,0 | 2,4 | 24 |
| | 4,0 | 3,1 | 45 |
| | 4,0 | 3,1 | 39 |
| | 3,9 | 3,2 | 55 |
| | 3,5 | 3,5 | 51 |
| | 2,4 | 2,3 | 50 |

Tableau 6: diamètre des fibres de laine de verre (IARC, 2002)

| Produit | Diamètre des fibres (µm) | | Particules (pourcentage par poids) |
|--|--------------------------|---------------------|--|
| | Moyenne | Déviati on standard | |
| Laine de verre (lots aléatoires) | 7,7 | 4,2 | 2 |
| | 5,8 | 4,7 | 0 |
| | 5,6 | 3,3 | 1 |
| | 5,3 | 3,2 | 5 |
| | 4,7 | 2,0 | 0 |
| | 4,0 | 2,4 | 1 |
| | 3,4 | 2,0 | 1 |
| | 3,3 | 2,7 | 0 |
| | 1,2 | 1,0 | 0 |
| | 0,6 | 0,5 | 0 |

Selon le FILMM (2007), les procédés de fibrage des laines minérales en régime turbulent génèrent des fibres avec un diamètre compris entre 1 et 10 µm ; un diamètre moyen entre 3 et 5 µm et un écart type défini entre 2 et 4 µm.

Le diamètre géométrique moyen pondéré par la longueur (D_g), demandé notamment par la directive 97/69/CE, s'effectue dans des conditions de mesure bien précises qui consistent à :

- ne mesurer le diamètre que pour les fibres qui traversent une ligne préalablement dessinée sur l'écran du microscope et passant par son centre ;
- ou bien ne mesurer le diamètre que pour les fibres qui traversent le centre de l'écran en effectuant un balayage suivant une seule direction.

Dans ces conditions et dans ces conditions seulement, la pondération par la longueur se fait naturellement, une fibre longue ayant plus de chance de traverser la ligne ou le point. La formule suivante peut alors s'appliquer.

$$D_g = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(D_i)\right)$$

L'écart-type associé à ce diamètre se calcule comme suit.

$$\sigma_g = \frac{\exp\left(\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(D_i) - \alpha)^2}\right)}{\sqrt{n}} \quad \text{avec } \alpha = \ln(D_g)$$

Cette formule fait référence réglementairement en Europe pour la mesure du diamètre des FMA.

Le diamètre géométrique moyen pondéré par la longueur se justifie en raison de l'impossibilité de mesurer la longueur des fibres dans le produit final. Les fibres dans les produits peuvent s'avérer longues de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres et se cassent lors de la préparation de l'échantillon avant l'observation au microscope. La pondération par la longueur conduit à rendre la mesure du diamètre géométrique indépendante de la longueur des fibres et donc de la méthode de préparation. Le FILMM a mandaté l'Institut für Toxikologie und Experimentelle Medizin de Fraunhofer (ITEM, Allemagne) afin de mesurer le diamètre moyen selon les prescriptions de la directive 97/69/CE, pour un seul échantillon de laine de roche et de laine de verre. Les résultats issus de cette étude indiquent pour la laine de roche, après l'analyse de 505 fibres, un diamètre moyen de 2,96 µm. Pour la laine de verre, le diamètre s'élève à 2,37 µm après l'analyse de 510 fibres.

La figure 10 présente la distribution granulométrique des laines de roche et des laines de verre testées par l'ITEM à la demande du FILMM.

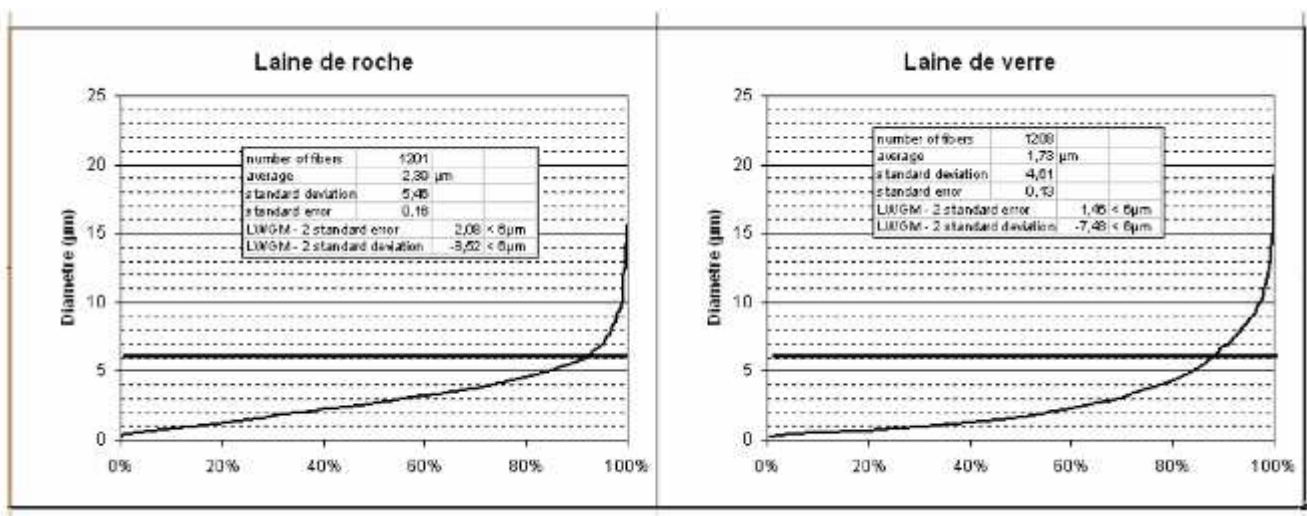


Figure 10: distribution granulométrique d'un échantillon de laines de verre et de laines de roche (FILMM, 2007)

La distribution granulométrique des laines de roche et des laines de verre en sortie de production révèlent une part importante de fibres alvéolaires (environ 60 % pour les laines de roche et 70 % pour les laines de verre).

Commentaires du groupe de travail sur le diamètre des fibres

Pour interpréter des mesures de diamètre, il est nécessaire de connaître les méthodes analytiques, le paramètre mesuré et l'origine des fibres (dans le produit ou en suspension dans l'air).

En effet, les variations des distributions des diamètres des laines minérales d'une étude à l'autre s'expliquent par :

- l'évolution des diamètres consécutive au changement des techniques de production,
- la nature de l'échantillon étudié (fibres dans le matériau, ou en suspension dans l'atmosphère),
- la méthode d'analyse retenue (MOCP, META ou MEBA),
- la définition du diamètre (diamètre géométrique, arithmétique, pondéré ou non par la longueur..).

Les experts soulignent la nécessité de ne pas baser l'évaluation des risques sur les caractéristiques du produit fini mais de procéder à des mesures de la concentration atmosphérique en fibres (sédimentation par gravité des fibres les plus grosses et remise en suspension des fibres les plus fines, ce qui limite la pertinence des caractéristiques du produit pour rendre compte de celles d'un aérosol).

La caractérisation de la longueur n'apparaît pas pertinente et dépend du procédé de fabrication, de l'usage et peut varier avec le vieillissement (ATSDR, 2004 ; Inserm, 1999).

3.1.6 Les liants

Pour les laines de verre et les laines de roche, des huiles et autres lubrifiants peuvent être ajoutés aux liants pour réduire l'émission de poussières. L'huile a été utilisée pour la première fois dans les années 1930 et les liants ont été introduits progressivement dans différentes usines au cours des années 1940 et 1950.

A noter que les occupants de bâtiments s'inquiètent aussi de la prolifération microbienne dans les matériaux de construction et du rejet subséquent de spores dans l'air intérieur. Afin de déterminer si des champignons ou des bactéries peuvent croître dans la laine de verre, les producteurs soumettent leurs produits à toute une gamme de tests standards, y compris le test C 665 ASTM (American Society of Testing Methods) pour les matériaux d'isolation. Ces tests ont démontré que des isolants en fibre de verre propres et secs ne favorisaient pas la prolifération de champignons et de bactéries.

Cependant, comme c'est le cas avec bien d'autres matériaux de construction, s'ils sont mal installés ou mal entretenus, les produits en laine de verre peuvent devenir sales et mouillés. Les débris et l'humidité pourraient alors favoriser la prolifération microbienne.

Le liant se définit comme un produit chimique éventuellement associé aux fibres en cours de fabrication pour leur conférer une texture adaptée à l'application à laquelle elles sont destinées et/ou pour éviter la libération de poussières en cours d'usage (Inserm, 1999). Le FILMM indique que les liants utilisés dans la production actuelle en France se limitent aux résines formo-phénoliques.

Les autres additifs appliqués sur les laines peuvent inclure des agents antistatiques, des agents d'élasticité, des stabilisants, des agents hydrophobes, des agents mouillants et des charges ou des stabilisateurs. Pour la projection, après le cardage des balles de laines minérales en vrac, le transformateur ajoute des liants hydrauliques (ciment ou plâtre) et des agents anti-poussières (des huiles minérales par exemple) à hauteur de 10 %.

Le liant contenu dans les laines d'isolation reste quantitativement faible, mais pour de fortes densités de produit on peut atteindre 25 % de la masse totale (RPA 2007). Le FILMM conteste cette information et estime que le liant ne représente pas plus de 5 % en masse totale. La teneur en liant des produits de laine isolante est habituellement inférieure à 5 % en poids (IARC 1988) mais elle peut atteindre jusqu'à 10 % (TIMA, 1991).

Certains produits restent exempts de tous liants ; ils sont utilisés soit pour une application dans laquelle l'intégrité des fibres de laines n'est pas nécessaire, soit dans le cas où cette intégrité est obtenue par d'autres moyens, comme l'encapsulation dans une gaine de plastique (IARC, 2002).

En règle générale, les laines minérales contiennent plus de 90% de fibres, 3 à 5% en moyenne de liants organiques (résine phénolique, formol, phénol ou urée-formolphénol) qui assurent la cohésion du produit et moins de 1% d'huile qui limite l'émission de poussière et l'absorption de l'eau.

La polymérisation résulte du chauffage à 250 °C sur la ligne de production. Le terpolymère se compose essentiellement d'eau, de résine phénolique, d'urée, de sulfate d'ammonium, d'ammoniaque, de silane, d'huile minérale, d'huile de silicone...

L'urée est mise en réaction avec la résine afin de la diluer, réduire le niveau de formaldéhyde libre et également pour améliorer la résistance au feu du produit final. Néanmoins, l'urée présente deux inconvénients principaux définis par la réduction de la solubilité de la résine et

sa décomposition éventuelle en ammoniac. L'urée varie entre 0 et 60 % au sein de la résine urée/phénol/formaldéhyde.

L'ammoniac améliore la solubilité du liant permettant d'ajouter plus d'urée et d'en augmenter sa stabilité. Il participe également au maintien du pH dans la gamme souhaitée et réagit avec le formaldéhyde libre.

Le sulfate d'ammonium permet de faciliter la polymérisation du liant.

Le silane se définit comme une interface essentielle entre le verre inorganique et le liant organique. Des huiles minérales et de silicone sont ajoutées afin d'améliorer les caractéristiques de manutention et l'hydrophobie des produits, et enfin pour supprimer la formation de poussière (FILMM, 2007).

La préparation de la résine peut être réalisée sur le site de production ou *ex situ*.

La composition du liant influence notamment la température de cuisson et le coût de production. Le liant doit se répartir sur la fibre et joue le rôle de point de soudure après la cuisson permettant ainsi de former une structure enchevêtrée. La quantité et la composition répondent à la balance entre formation de la structure en trois dimensions et souplesse de la laine pour éviter une rupture.

Le livre blanc du FILMM (FILMM 2002) souligne que le liant est polymérisé pendant la production, lors de son passage dans une étuve. A la suite d'une réaction chimique et thermique, il devient solide et contient une faible quantité résiduelle de formaldéhyde libre (activité biocide) susceptible de s'échapper du produit lors de la pose ou de l'utilisation (Tibloux A. 2002). Des mesures normalisées de formaldéhyde ont été réalisées dans l'air ambiant, à l'intérieur des locaux isolés avec des laines manufacturées (CEE 1990, Wen, and Palling 1993, Marutzky, Meyer, and Schwartz 1993, Tiesler et al. 1983, TNO 1994). Le tableau 7 récapitule les concentrations de formaldéhyde dans l'air ambiant publiées dans la littérature et recensées dans le livre blanc du FILMM (FILMM, 2002).

Tableau 7: Niveaux de concentration en formaldéhyde dans l'air de locaux isolés avec les laines manufacturées (FILMM, 2007)

| <i>Référence bibliographique</i> | <i>Niveaux de concentration (ppm)</i> |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| TNO, 1994 | 0,009 à 0,037 |
| Marutzky et al., 1993 | < 0,08 |
| Tiesler et al., 1983 | < 0,08 |

(Nelson et al. 2005, Nielsen, Hammer, and Hansen 1997) ont testé des dalles de faux-plafond en laines de verre dans des chambres d'émissions. Ils n'ont relevé aucune émission de formaldéhyde à partir de ces produits. Toutefois, ces données sont divergentes de celles produites par le CSTB dans le cadre de cette saisine.

En effet, l'Afsset a mandaté le CSTB et le LEPI afin d'associer leurs compétences en vue de caractériser d'une part les matériaux isolants neufs ou anciens (prélèvement d'échantillons sur sites) et d'autre part les libérations de FMA sur les chantiers de retrait de laines minérales isolantes.

Ainsi, cette étude (Cf Annexe 3) a consisté en :

- La caractérisation des émissions de COV et d'aldéhydes,
- La caractérisation du relargage en fibres des matériaux,
- Des analyses de caractérisation,
- La caractérisation de la pollution atmosphérique en termes de FMA.

La caractérisation des émissions de COV et de formaldéhyde concernait huit produits isolants en laine minérale neufs ou anciens, à l'aide de méthodes normalisées de chambre d'essai d'émission :

1. Rouleau laine de verre neuf
2. Dalle de plafond laine de verre neuve
3. Flocons vrac laine de roche neufs
4. Flocage neuf
5. Flocage ancien
6. Rouleau laine de verre ancien
7. Flocons vrac anciens
8. Dalle de plafond ancienne.

Les résultats obtenus montrent, dans un premier temps, que, pour tous les produits testés, les émissions de COV individuels et de COV totaux (TVOC) sont relativement faibles.

Le principal composé émis par ces différents produits d'isolation reste le formaldéhyde, reflétant vraisemblablement la présence d'une résine formo-phénolique (ou son absence pour le flocage neuf) (Figure 11).

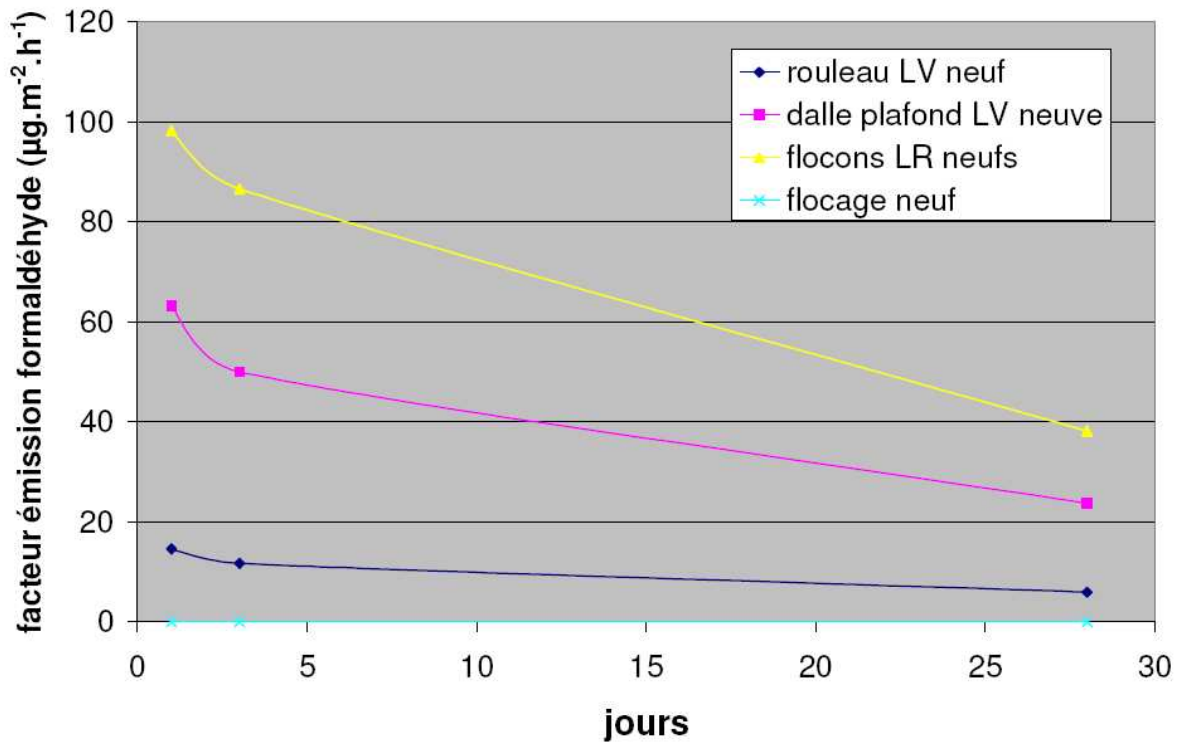


Figure 11: Facteurs d'émission spécifiques ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) en formaldéhyde pour les 4 produits neufs (CSTB, 2007)

Par ailleurs, les essais réalisés sur les produits anciens montrent que les émissions de formaldéhyde peuvent perdurer, même après plusieurs années de pose. Ainsi, le niveau d'émission de formaldéhyde à 3 jours des 2 éprouvettes de la dalle de plafond ancienne (9 ans) est équivalent au niveau d'émission à 28 jours de la dalle neuve (Figure 12).

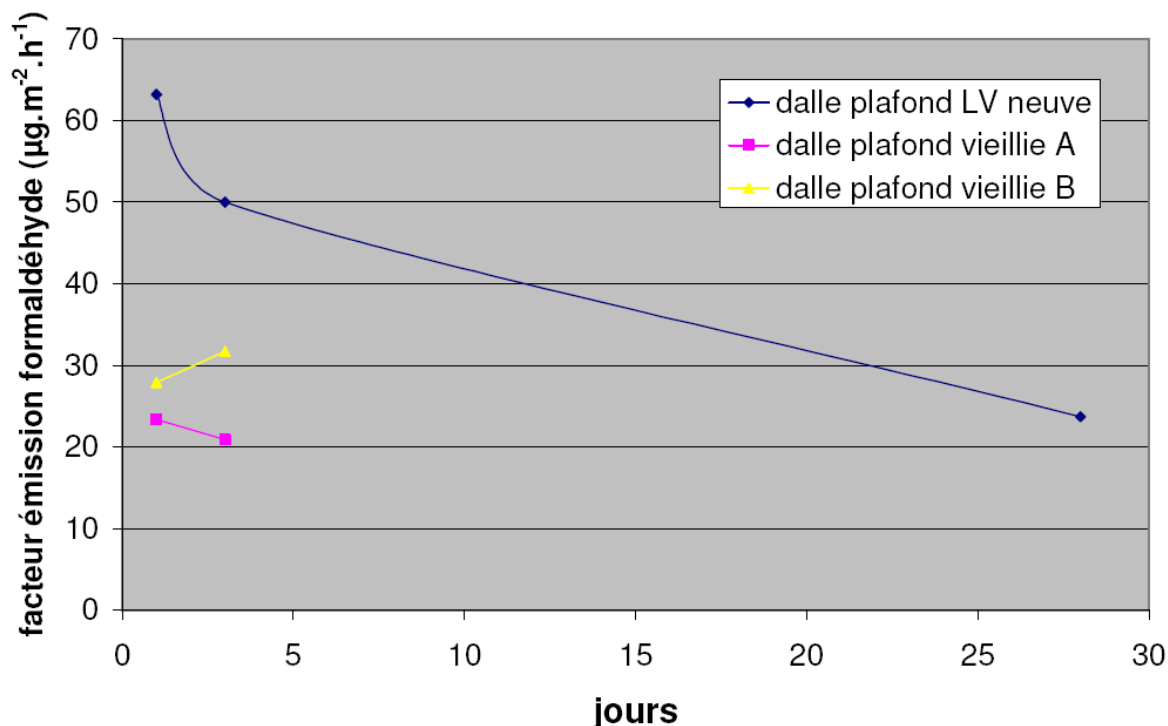


Figure 12: Facteurs d'émission spécifiques ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) en formaldéhyde pour les dalles de plafond neuve et vieillie (CSTB 2007)

Sur les 2 éprouvettes testées pour les produits anciens, on constate une certaine variabilité des émissions qui peut traduire l'hétérogénéité des produits (composition initiale et phénomènes de vieillissement) et l'incertitude sur la mesure (de l'ordre de 20 %). En effet, l'augmentation du facteur d'émission spécifique au 3^{ème} jour pour la dalle plafond ancienne B et la diminution pour la dalle de plafond ancienne A ne sont pas significatives et s'expliquent par l'incertitude sur la mesure.

Pour les autres produits anciens, aucune émission de formaldéhyde n'a été détectée.

A température ambiante, température de la plupart des applications des laines minérales, le FILMM indique que les émissions de formaldéhyde sont très faibles et décroissent rapidement au cours du temps. Les données expérimentales du CSTB ne confirment pas ces résultats.

Pour certaines applications telles que les fours électroménagers, les producteurs ont des solutions sans liant organique. Ces solutions sont utilisées en Europe. Pour les autres usages, si l'utilisation d'un produit sans liant n'est pas possible, les fiches de données de sécurité informent sur ce dégagement lors de la première chauffe et préconisent d'aérer ou de se protéger si l'aération n'est pas suffisante (FILMM, 2007).

Un dégagement de formaldéhyde peut se produire lorsque le produit est porté pour la première fois à une température supérieure à 200 °C, entraînant ainsi une dégradation thermique de l'encollage polymérisé. Cette température est atteinte uniquement dans des applications industrielles ou lors du premier nettoyage par pyrolyse d'un four électrique ou domestique. Dans ce dernier cas, une bonne ventilation doit être assurée pendant la courte durée de ce dégagement (FILMM, 2007).

Par conséquent, le formaldéhyde peut se vaporiser lorsque ces produits sont utilisés pour isoler des chaudières, des fours ou des tuyaux (isolation de conduites de fluides chauds dans l'industrie chimique par exemple) dont la température dépasse 200 °C pendant le chauffage initial provoquant ainsi un dégagement de formol, de phénol et d'autres composés pouvant irriter les yeux, le nez ou la gorge. Il est alors nécessaire d'utiliser une protection respiratoire adaptée pendant le chauffage initial.

RPA (2007) a analysé une étude de Graa Thomsen & Soderlund (Graa Thomsen K and & Soderlund E 1995) sur la toxicité d'une résine phénol-formaldéhyde. Les résultats sont synthétisés dans la suite du paragraphe. Les auteurs indiquent que la résine contient certaines impuretés comme des intermédiaires de réaction, des matières premières et des produits de dégradation. Les études expérimentales et les observations épidémiologiques montrent clairement que la résine peut entraîner des irritations oculaires, dermiques et des muqueuses.

Un certain nombre d'agents sensibilisants ont été détectés dans les résines phénol-formaldéhyde. Les études épidémiologiques et certaines observations médicales rapportent clairement que les résines phénol-formaldéhyde peuvent causer des dermatites de contact. Entre 1 et 3 % de la population atteinte d'affections dermiques présente une réaction positive à ce type de résines (Graa Thomsen K and & Soderlund E 1995).

Concernant les résines incluant le terpolymère phénol-formaldéhyde-urée, RPA (2007) évoque une publication de Karlsson sur l'émission issue de la composition du terpolymère. Les auteurs ont étudié l'exposition aux isocyanates (Karlsson et al. 2001). Ils notent que, durant la dégradation thermique des résines phénol-formaldéhyde-urée, des quantités conséquentes de méthyl isocyanate sont émises. Les auteurs ont mis en évidence, après chauffage d'une résine phénol-formaldéhyde-urée, des niveaux élevés d'acide isocyanique. Lorsque les laines minérales se dégradent thermiquement, les auteurs observent l'émission d'acide isocyanique et de méthyl isocyanate. Les quantités émises dépendent évidemment de la qualité du produit notamment la proportion de résine.

Les laines de laitier ne contiennent pas de liants (FILMM, 2007).

Suite à la publication d'un arrêté en date du 13 juillet 2006, en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2007, « les travaux exposant au formaldéhyde » sont inclus dans la liste des procédés cancérogènes au sens du deuxième alinéa de l'article R. 231-56 du code du travail. Cet arrêté concerne le domaine professionnel et demande à l'employeur d'engager en première intention et de justifier la recherche d'alternatives au procédé dit cancérogène.

Les industriels indiquent les contraintes des procédés de fabrication soulignant ainsi les bonnes performances de la résine formo-phénolique et la difficulté à la substituer. Une bonne résine doit présenter les propriétés suivantes :

- Solubilité dans l'eau ;
- Stabilité entre la production de la résine et son utilisation en usine ;
- Viscosité dans une plage permettant son utilisation et une bonne répartition sur les fibres ;
- Faible corrosivité dans les solutions alcalines ;
- Faible combustibilité pour les applications finales ;
- Pulvérisation avec un spectre de granulométrie adéquat pour optimiser le rendement du liant (à savoir mettre un minimum de liant permettant d'obtenir les propriétés requises des produits) ;

Concernant la réactivité, la résine est soumise aux exigences suivantes :

- Ne doit pas réagir immédiatement après la pulvérisation sur les fibres. Ceci détériorerait les propriétés des produits ;
- Doit réagir rapidement et à faible température dans l'étuve de polymérisation ;
- pH proche du neutre pour permettre une utilisation avec diverses compositions de verre ou roche ;
- Limitation des développements bactériens dans les eaux de lavage : protection des salariés, du voisinage mais aussi garantie que les produits ne développeront pas de moisissures ;

Les contraintes relatives aux caractéristiques des produits finis incluant notamment la résistance mécanique, la stabilité, la sécurité en cas d'incendie....

Les industriels rappellent qu'une technologie alternative doit répondre à toutes ces exigences de procédés et de produits.

A l'heure actuelle, selon les industriels auditionnés, les alternatives éventuelles ne répondent pas à l'ensemble de ses attentes. Elles incluent les résines suivantes :

- **Résine phénolique à basse teneur en formaldéhyde ;**
- **Polyacétate de vinyle**

Ces résines restent relativement coûteuses (200 à 300 % par rapport aux résines formo-phénoliques) et présentent des performances inférieures. Les émissions de COV restent de plus inconnues.

- **Polyesters (y compris PVOH, Polyacryliques) ;**

Une résine acrylique est exploitée commercialement aux Etats-Unis pour la fabrication de laines minérales. L'application de cette résine concerne seulement une partie des produits commercialisés et certains industriels soulignent les performances moindres des produits en question (augmentation de l'émission de poussières, propriétés mécaniques inférieures, caractère corrosif pour les équipements de production et nécessité d'adapter les équipements de polymérisation (étuves), incompatibilité avec d'autres liants employés sur le site (incidence pour les eaux de nettoyage)...) et un coût plus élevé (250 à 300 % par rapport aux résines formo-phénoliques). Enfin, ces nouvelles résines n'ont pas fait l'objet d'études toxicologiques aussi complètes que les résines phénoliques et aucune comparaison des risques des 2 solutions n'est disponible. Par exemple, l'impact de ces nouvelles résines sur la tenue aux moisissures des produits d'isolation en laines minérales en cas d'humidité anormale n'a pas été évalué.

- **Epoxy et polyuréthane ;**

Même si leurs propriétés individuelles sont intéressantes (tension mécanique élevée pour la première, chimie polyvalente et temps de cuisson rapide pour la seconde), ces deux résines présentent un coût largement supérieur à celui des résines formo-phénoliques (facteur de 300 à 400 %) et de possibles conséquences pour la santé (par exemple, certains époxydes provoquent des dermatites et les polyuréthanes contiennent des isocyanates (effets respiratoires et cutanés) et présentent de mauvaises propriétés contre l'incendie)

- **Résines inorganiques ;**
- **Résines naturelles.**

L'Afsset a pu vérifier l'implication de certains industriels dans la recherche et le développement des alternatives aux résines formo-phénoliques, d'autres n'ont pas souhaité répondre.

3.1.7 Les producteurs de laines minérales

Le document le plus ancien documentant la production de laine de laitier date des années 1840 au Pays de Galle. Aux Etats-Unis, la production initiale de laine de laitier date de 1869. Certaines sources suggèrent que le premier site de production viable de laine de laitier s'est implanté à Manchester, Angleterre, en 1885 ; alors que le premier site de production aux Etats-Unis date de l'année 1875 dans le New Jersey à Stanhope. La production commerciale de laine de roche débute aux Etats-Unis à Alexandria, Indiana, aux alentours de 1897, à partir de schistes calcaires. Aujourd'hui, la fabrication de laine de roche est alimentée par des roches ignées, telles que la diabase, le basalte et l'olivine, parfois avec l'addition de laitier.

La production européenne débute avec les laitiers de types variés et se prolonge jusqu'au milieu des années 1940. Après la seconde guerre mondiale, la plupart des sites de production se sont orientés préférentiellement vers la roche comme matière première. A l'heure actuelle, la plupart des sites européens emploie largement plus la roche que le laitier pour la production de laines.

Aux Etats-Unis, la production de laine de roche a dominé les années entre 1900 et 1930. A cette date, certains sites utilisant la roche ont utilisés du laitier ferreux ou provenant des hauts fourneaux, ces matières premières étant issues de la fonte de première fusion. Cette conversion s'explique principalement pour des raisons économiques. Le laitier formé lors de la réduction du minerai de fer en fonte brute constitue, à l'heure actuelle, la matière première principale destinée à la production de la laine de laitier aux Etats-Unis. Ce type de laitier représente entre 70 et 90 % du volume de matière première.

La laine de laitier a conquis une place de plus en plus importante comme matériau d'isolation dans les deux premières décennies de ce siècle, surtout dans les applications techniques (chaudières, tuyauteries...). La fabrication de laine de roche a débuté au début des années 1950, avec la méthode de production employée pour la laine de laitier, et, pour matière première, divers types de roche (souvent utilisées en association avec du laitier). La laine de roche est progressivement devenue un matériau d'isolation d'intérêt dans le bâtiment,...notamment afin de remplacer la sciure et les cendres (IARC, 2002).

Depuis le milieu des années 1970, l'industrie américaine de la laine de laitier dépend entièrement du laitier provenant des hauts fourneaux additionné d'additifs tels que le laitier de phosphate provenant de fours en fusion et de substances naturelles comme le gravier de silice, du carbonate de calcium, de la syénite néphélinique ; et pour certaines laines colorées, une faible quantité d'un laitier composé de cuivre et d'arsenic libre. Aux Etats-Unis, les sites de production de laines de roche utilisent de la roche basaltique, du carbonate de calcium, de l'argile, du feldspath et certains additifs mentionnés précédemment (TIMA, 1991).

La production initiale de laine de verre aux Etats-Unis date des années 1930 à partir de verre borosilicaté en fusion. L'utilisation de ce matériau s'est rapidement répandue, notamment aux Etats-Unis puis à travers l'Europe.

3.1.7.1 La production mondiale

Bien que des usines de laine de roche et de laine de laitier fussent déjà en fonctionnement aux USA ou à travers l'Europe dans les années 1900, cette industrie a commencé à s'accroître après la première guerre mondiale. A partir de 1928, au moins 8 usines étaient en fonctionnement aux Etats-Unis. A partir de 1939, le nombre d'usine de laine de verre, de roche et de laitier aux USA s'est accru à plus de 25.

Les fabricants de fibres de verre ont ouvert un nouveau marché tel que la fabrication de textile, pendant que les fabricants de laine de roche et de laine de laitier ont continué à fournir le marché de l'isolation thermique. Le nombre d'usines de laine de roche et de laitier

aux USA a atteint son maximum, entre 80 et 90 sites, dans les années 1950 puis a commencé à décliner tandis que la laine de verre connaissait une utilisation croissante dans l'isolation thermique. En Europe, les usines de laine de roche ont prédominé jusqu'au milieu des années 1970, avant l'emploi croissant de la laine de verre (IARC, 2002).

Le tableau 8 présente l'évolution des volumes de production pour les produits à base de laines de verre, de roche et de laitier aux Etats-Unis.

Tableau 8: volumes de production pour les produits à base de laines de verre, de roche et de laitier aux Etats-Unis (IARC, 1988 ; ATSDR, 2004)

| <i>Produit</i> | <i>Quantité en 1977 (milliers de tonnes)</i> | <i>Quantité en 1982 (milliers de tonnes)</i> |
|--|--|--|
| <i>Laines pour l'isolation</i> | | |
| <i>Fibres en vrac et granulé</i> | 373,2 | 327,2 |
| <i>Panneaux, rouleaux et nattes pour le bâtiment</i> | 763,8* | 1 000,7 |
| <i>Isolation acoustique, par ex pour le mur ou le plafond</i> | <i>Non disponible</i> | 46,3 |
| <i>Laine pour l'industrie, les équipements et isolation des applications</i> | | |
| <i>Nappes, rouleaux et nattes flexibles (simples)</i> | 167,8 | 173,2 |
| <i>Nappes, rouleaux et nattes flexibles (enduites)</i> | 16,5 | 21,4 |
| <i>Nappes, rouleaux et nattes flexibles (revêtues)</i> | 24,0 | <i>Non disponible</i> |
| <i>Isolation spécifique</i> | 19,6 | 11,5 |
| <i>Blocs et panneaux</i> | 46,0 | 10,0 |
| <i>Isolation des canalisations</i> | 30,5 | 26,8 |
| <i>Acoustique, notamment rembourrage, panneaux et pièces</i> | 24 | <i>Non disponible</i> |

* **valeur minimale en l'absence de toutes les données du marché concernant cette catégorie**

En 1985, la production mondiale de FMA a été estimée entre 6 et 6,5 millions de tonnes avec la répartition suivante (pourcentages applicables aux Etats-Unis). Les fibres de verre (laine de verre et filaments continus de verre) représentaient 80 % de la production américaine, dont 80 % correspondaient aux laines de verre principalement utilisées dans l'isolation acoustique et thermique. Les laines de roche et de laitier représentaient entre 10 et 15 % de la production américaine de FMA et étaient également destinées à l'isolation acoustique et thermique. En Europe, ces laines connaissent approximativement les mêmes volumes de production et les mêmes applications.

Le tableau 9 donne le nombre d'usines dans différentes régions en 2000, et le volume de FMA produit par ces usines sont présentées dans le tableau 10 (IARC, 2002).

Tableau 9: nombre d'usines fabricant de la laine de verre, de roche et de laitier dans différentes régions du monde (IARC, 2002)

| Lieu | Laine de verre | Laine de roche et laine de laitier |
|-------------------------------|----------------|------------------------------------|
| Australie et nouvelle Zélande | 4 | 1 |
| Canada | 8 | 3 |
| Europe | 30 | 30 ^a |
| Japon et chine | 6 | 8 |
| USA | 32 | 12 |

^A **Inclut la fabrication de laine riche en alumine et pauvre en silice**

Tableau 10: volumes de laine de verre, de roche et de laitier produits par région (milliers de tonnes) (IARC, 2002)

| Lieu | Année | Laine de verre (en milliers de tonnes) | Laine de roche et de laitier (en milliers de tonnes) |
|-------------------------------|-------|--|--|
| Australie et nouvelle Zélande | 2000 | 42 | 6 |
| Europe | 2000 | 1300 | 1200 ^a |
| Japon et Chine | 1999 | 223 | 342 |
| USA | 2000 | 1950 | 746 |

^a **Inclut la fabrication de laine riche en alumine et pauvre en silice**

La laine de verre constitue la principale FMA produite aux Etats-Unis. En 2002, Le Glass Manufacturing industry Council (GMIC) relevait 10 entreprises majeures réparties à travers 40 sites sur le territoire américain et estimait que le volume de production de fibres de verre incluant notamment la laine de verre s'élevait annuellement à 2,72 millions de tonnes (ATSDR 2002). En 1993, la production annuelle de laines de roche et de laines de laitier s'élevait à 550 250 tonnes et représentaient environ entre 10 et 15 % de la quantité de FMA produite aux Etats-Unis. Pour comparaison, au Canada, le volume total de production des FMA s'élevait entre 250 000 et 300 000 tonnes et se répartissait entre 70 % de laines de verre, 20 % de laines de roche et de laitier, 10 % de filaments continus de verre et moins de 1 % de FCR (Environnement Canada 1993).

En 2001, une production annuelle de FMA estimée à 9 millions de tonnes résultait d'une centaine de sites répartis à travers le monde. Les laines de verre représentaient environ 3 millions de tonnes, les laines de roche et de laitier représentaient le même volume. Dans les années récentes, les laines à haute teneur en alumine et faible teneur en silice représentaient une production annuelle de 1 million de tonnes en substituant les laines de roche et les laines de laitier dans leurs applications (Baan & Grosse, 2004 ; IARC, 2002).

Le tableau 11 décrit l'évolution de la demande mondiale pour l'isolation au cours des années 1990.

Tableau 11: demande mondiale pour l'isolation (IARC, 2002)

| | 1989 | 1994 | 1999 |
|---|-------------|-------------|--------------|
| DEMANDE MONDIALE POUR L'ISOLATION (MILLIERS DE TONNES) | 8564 | 9060 | 10683 |
| LAINES DE ROCHE ET DE LAITIER (MILLIERS DE TONNES) | 2641 | 2738 | 3090 |
| LAINES DE VERRE (MILLIERS DE TONNES) | 2646 | 2800 | 3493 |

Le tableau 12 évoque l'évolution de la demande en laines minérales par région du monde.

Tableau 12: demande en laine de roche / de laitier et laine de verre par région du monde (IARC, 2002)

| | 1989 | | 1994 | | 1999 | |
|--------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| | LAINES DE ROCHE / DE LAITIER | LAINES DE VERRE | LAINES DE ROCHE / DE LAITIER | LAINES DE VERRE | LAINES DE ROCHE / DE LAITIER | LAINES DE VERRE |
| AMÉRIQUE DU NORD | 223 (8,4%) | 1508 (56,9%) | 208 (7,6%) | 1542 (55,1%) | 236 (7,6%) | 1915 (54,8%) |
| EUROPE DE L'OUEST | 1195 (45,2%) | 690 (26%) | 1259 (46%) | 757 (27%) | 1374 (44,5%) | 812 (23,2%) |
| LE RESTE DU MONDE | 1223 (46,3%) | 450 (17%) | 1271 (46,4%) | 500 (17,9%) | 1480 (47,9%) | 770 (22%) |

3.1.7.2 La production européenne

Le diagramme (figure 13) proposé par l'ECFIA, associant les producteurs européens de laines d'isolation haute température, propose une répartition européenne des différentes catégories de FMA dont une large proportion représente les laines minérales suivies par les filaments de verre continus (respectivement 80% et 18%).

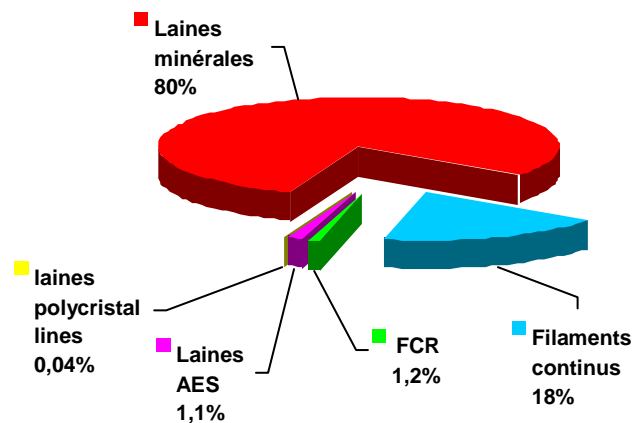


Figure 13: production des laines minérales artificielles vitreuses en Europe : 2.5 millions de tonnes/an ((ECFIA 2005; Environnement Canada 1993)

Les laines minérales sont ainsi définies par une production européenne annuelle de 2 000 000 tonnes. Le FILMM (2007) estime cette production de laines minérales à 1 200 000 tonnes.

3.1.7.3 La production française

Les producteurs français sont regroupés actuellement en deux syndicats distincts ; le syndicat national des fabricants d'isolants en laines minérales manufacturées (FILMM) créé en 1977 et réunissant 5 producteurs de laine de verre et de laine de roche et le syndicat professionnel des fabricants de laine de roche (SPLR) créé en 2005 et réunissant 2 producteurs de laine de roche.

Le FILMM assure en France la représentation des industries des laines minérales manufacturées (laine de verre et laine de roche), incluant :

- Knauf Insulation (pas de site de production en France) ;
- Saint Gobain Ecophon (pas de site de production en France) ;
- Saint Gobain Eurocoustic (1 site de production de laines de roche et de laitier en France) ;
- Saint Gobain Isover (2 sites en France) ;
- URSA France SAS (1 site en France).

Le SPLR défend les intérêts des industriels produisant exclusivement des produits en laine de roche et appuie le FILMM sur la promotion de l'isolation. Les deux fabricants concernés incluent :

- Rockwool France SAS (1 site en France) ;
- Flumroc S. A (pas de site de production en France).

Les données intéressant les producteurs concernent la situation actuelle et ne présentent pas les éventuelles acquisitions, ventes et rachats des entreprises. En effet, la situation apparaît mobile sur le marché de la production. A noter qu'en 2004, le site de Saint Etienne du Rouvray produisant alors de la laine de roche a été fermé.

Les cessions de produits (importations et exportations) semblent très fréquentes entre les sites d'un même groupe selon la demande du marché en produits d'isolation. Il existe donc de nombreux échanges entre les plateformes des groupes principalement en Europe.

Les données caractérisant les tonnages de laines minérales produites en France paraissent difficilement estimables en raison de la dimension européenne des groupes industriels et du respect des lois relatives à la concurrence. De manière générale, les producteurs indiquent que la production nationale de laines minérales s'adresse principalement au marché intérieur. Cependant, lorsqu'il s'agit d'un produit spécifique, notamment pour les voiles de renforcement, un seul site européen assure la production et approvisionne les autres pays.

Les industriels indiquent que la tendance européenne apparaît similaire à la tendance mondiale avec une augmentation croissante suite aux deux chocs pétroliers et les exigences requises par le protocole de Kyoto demandant une baisse de la consommation d'énergie et, par conséquent, une meilleure isolation. Les pays de l'est, suite à leur entrée dans l'espace européen, connaissent une croissance décalée mais fulgurante. Toutes les données sont à pondérer au prorata du nombre de logements.

La Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) ne dispose pas d'éléments chiffrés en matière de volume de vente pour les FMA.

3.1.7.4 Les importations et exportations françaises (cessions entre sites de production)

Le tableau 13 présente les statistiques commerciales d'importations et d'exportations françaises, correspondant à des cessions entre sites de production, pour certaines classes de produits incluant les laines minérales :

1. les laines de laitier, de scories, de roche et laines minérales similaires, même mélangées entre elles, en vrac, panneaux ou rouleaux ;
2. les bourrelets et les coquilles de laines de verre pour l'isolation des tuyauteries ;
3. les nappes, matelas, panneaux et produits similaires non tissés de laines de verre. La définition de la dernière classe n'apparaît pas très explicite et pourrait inclure des filaments de verre continus ou des microfibres de verre.

Les données proposées sont issues des statistiques commerciales disponibles sur le site de l'export helpdesk. Ce service en ligne a été mis en place par la commission européenne pour faciliter l'accès des pays en développement aux marchés de l'Union Européenne. Les gestionnaires du site indiquent que le site propose des estimations qui n'ont qu'une valeur informative et non légale.

A titre indicatif, les statistiques françaises et européennes inhérentes aux classes décrites ci-dessus sont présentées dans l'annexe 4.

Tableau 13: Cessions de produits contenant des laines minérales entre sites de production pour la France (d'après Export Helpdesk, 2007)

| | | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
|--|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| statistiques commerciales pour les laines de laitier, de scories, de roche et laines minérales similaires, même mélangées entre elles, en masses, feuilles ou rouleaux (en tonnes) | Total EXTRA-EUR25 importation | 18231,8 | 14817,7 | 14022,3 | 12198,8 | 14874,8 | 13323 | 16514,2 |
| | Total INTRA-EUR25 importation | 58482,5 | 56218,7 | 56968,6 | 57717,6 | 71477,2 | 74501,4 | 96137,9 |
| | Total importation | 76714,3 | 71036,4 | 70990,9 | 69916,4 | 86352 | 87824,4 | 112652,1 |
| | Total EXTRA-EUR25 exportation | 5711,9 | 6013,4 | 6537,9 | 7176,9 | 6111,3 | 6884,4 | 7212,4 |
| | Total INTRA-EUR25 exportation | 70088,9 | 55756,5 | 52706,3 | 47816,2 | 39148,3 | 39185,7 | 41166,4 |
| | Total exportation | 75800,8 | 61769,9 | 59244,2 | 54993,1 | 45259,6 | 46070,1 | 48378,8 |
| bourrelets et coquilles de laines de verre pour l'isolation des tuyauteries (en tonnes) | Total EXTRA-EUR25 importation | 2,6 | 4,5 | 6,7 | 4,1 | | 0,7 | 0,6 |
| | Total INTRA-EUR25 importation | 158,5 | 51,4 | 156,4 | 236,3 | 274,2 | 306,9 | 203,3 |
| | Total importation | 161,1 | 55,9 | 163,1 | 240,4 | 274,2 | 307,6 | 203,9 |
| | Total EXTRA-EUR25 exportation | 251,9 | 168,1 | 85,2 | 74 | 53,6 | 166,5 | 82,8 |
| | Total INTRA-EUR25 exportation | 77,8 | 13,3 | 23,5 | 18,6 | 15,2 | 21,3 | 31,9 |
| | Total exportation | 329,7 | 181,4 | 108,7 | 92,6 | 68,8 | 187,8 | 114,7 |
| nappes, matelas, panneaux et produits similaires non tissés de laines de verre (en tonnes) | Total EXTRA-EUR25 importation | 10926,6 | 5342,8 | 858,5 | 5954,5 | 12944,4 | 14866,1 | 11978,1 |
| | Total INTRA-EUR25 importation | 73087,6 | 75235,4 | 58010,3 | 76430,6 | 71611,4 | 96793,6 | 103779,3 |
| | Total importation | 84014,2 | 80578,2 | 58868,8 | 82385,1 | 84555,8 | 111659,7 | 115757,4 |
| | Total EXTRA-EUR25 exportation | 829,6 | 1177,4 | 1510,3 | 2183,4 | 2349,1 | 2147,5 | 2558,4 |
| | Total INTRA-EUR25 exportation | 4228,4 | 4711,5 | 4566,8 | 4449,7 | 4696,3 | 4313,3 | 9093,1 |
| | Total exportation | 5058 | 5888,9 | 6077,1 | 6633,1 | 7045,4 | 6460,8 | 11651,5 |

3.1.7.5 Les ventes françaises

La fabrication et l'utilisation des laines minérales d'isolation débutent dans les années 1920, mais c'est surtout à partir du choc pétrolier de 1973 et des mesures prises par les pouvoirs publics en matière de réglementation thermique pour économie d'énergie que le marché des laines minérales prend tout son essor.

Le marché de l'isolation thermique a fortement augmenté durant les vingt dernières années. 70 % du parc existant ont été construits avant 1975 hors toute réglementation thermique et acoustique. Il est passé en France de 12 millions de m³ à la fin des années 1970 à environ 20 millions de m³ actuellement.

En France, les emplois bâtiment pour l'année 2000 étaient de l'ordre de 12 à 13 millions de m³ pour la laine de verre, et de 3 à 4 millions de m³ pour la laine de roche. Pour le marché national résidentiel, la laine de verre représentait 10 millions de m³, la laine de roche, 2,5 millions de m³ environ. L'emploi de la laine de roche a fortement progressé puisqu'elle ne représentait que 5 % du marché en volume à la fin des années 1970 (FILMM, 2007).

La longévité de ces matériaux reste étroitement liée à celle de leur application dans le bâtiment et le FILMM estime cette durée de l'ordre de 50 ans voire plus avec des retraits annuels très faibles (FILMM, 2007). Le marché de l'isolation du bâtiment défini comme le marché prépondérant pour les laines minérales reste étroitement lié à la construction notamment de logements. La figure 14 présente le nombre de logements construits au cours des dernières décennies.

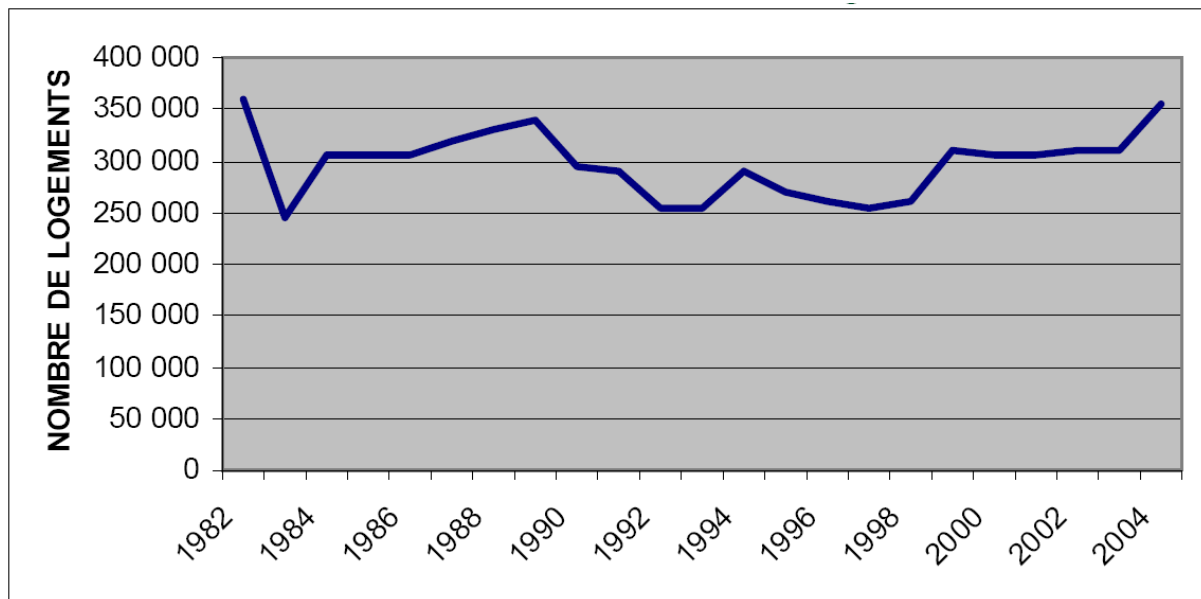


Figure 14: données de la construction en France (logements neufs) (FILMM, 2007)

Le FILMM propose à travers les trois figures suivantes une estimation, pour la France, des ventes de laines minérales en distinguant :

- la répartition entre les producteurs (figure 15) ;
- la répartition entre les laines de verre et les laines de roche associées aux laines de laitier exprimée en tonnage (figure 16) ;
- la répartition entre les laines de verre et les laines de roche associées aux laines de laitier exprimée en volume (figure 17).

Les données de ventes de laines minérales sur le territoire français impliquent par conséquent la production additionnée de l'importation et minorée par l'exportation.

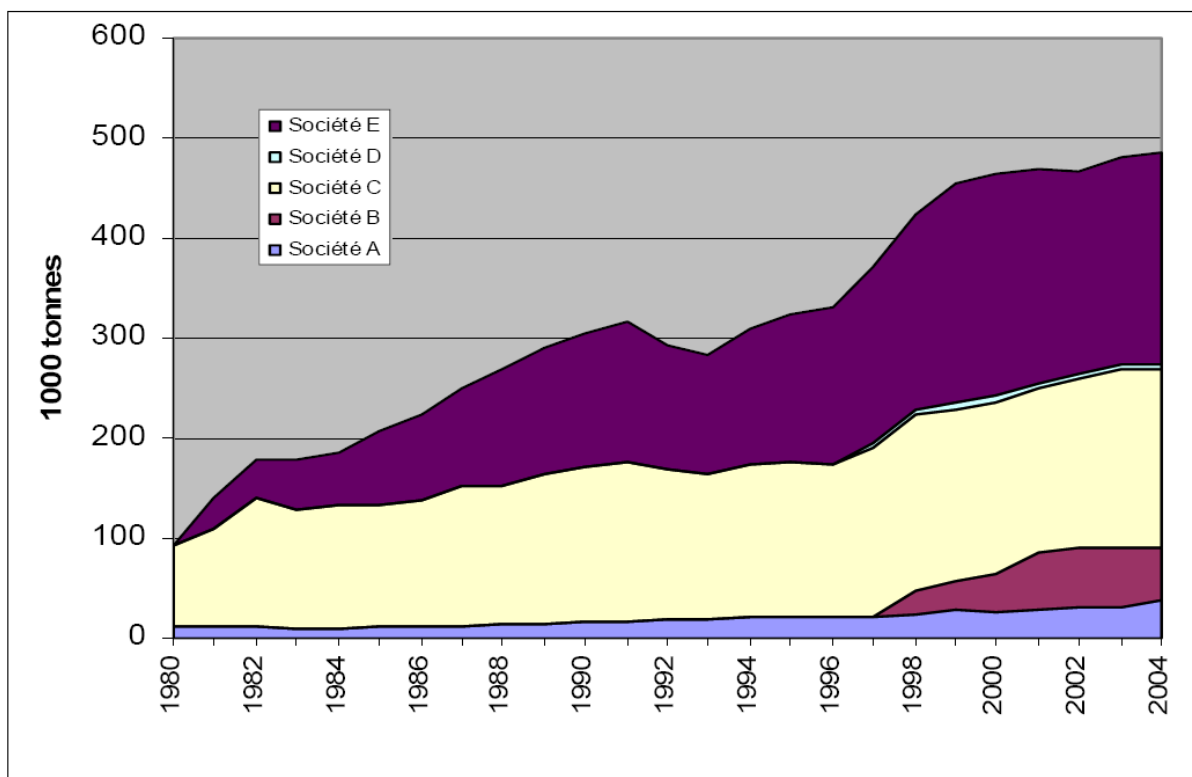


Figure 15: ventes de laines minérales (laine, roche, laitier) entre 1980 et 2004 (FILMM, 2007)

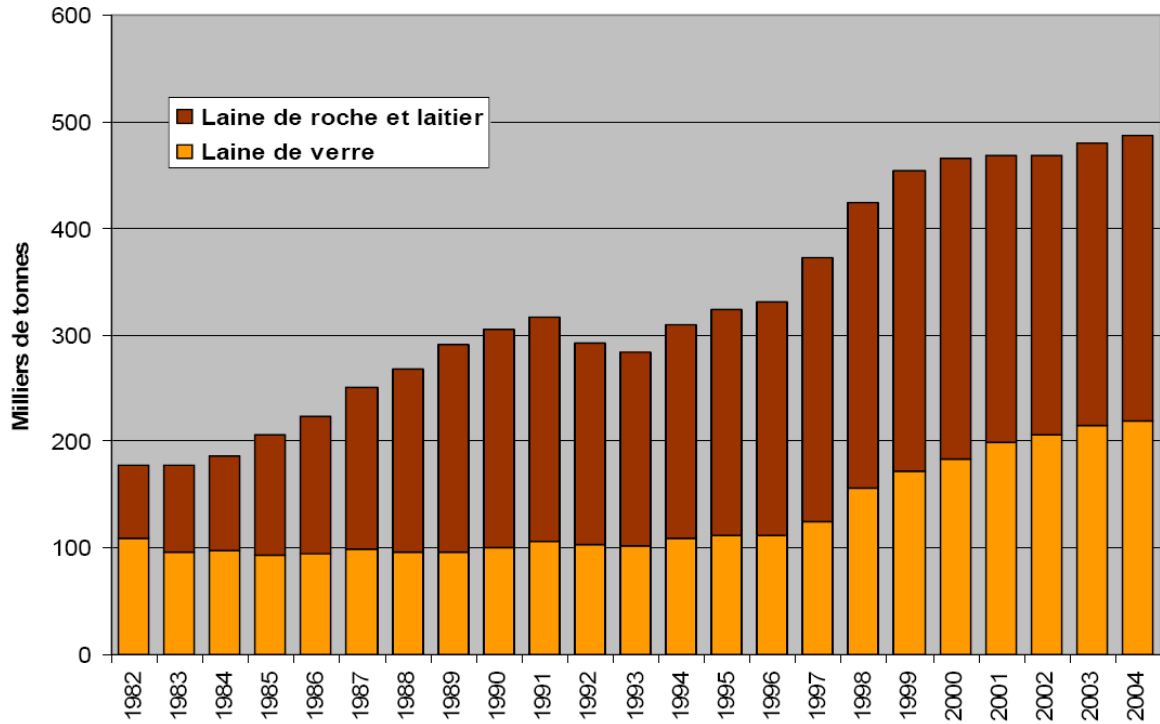


Figure 16: ventes de laines minérales (verre, roche, laitier) en tonnes entre 1982 et 2004 (FILMM, 2007)

La laine de laitier représente environ 1 % de la production totale.

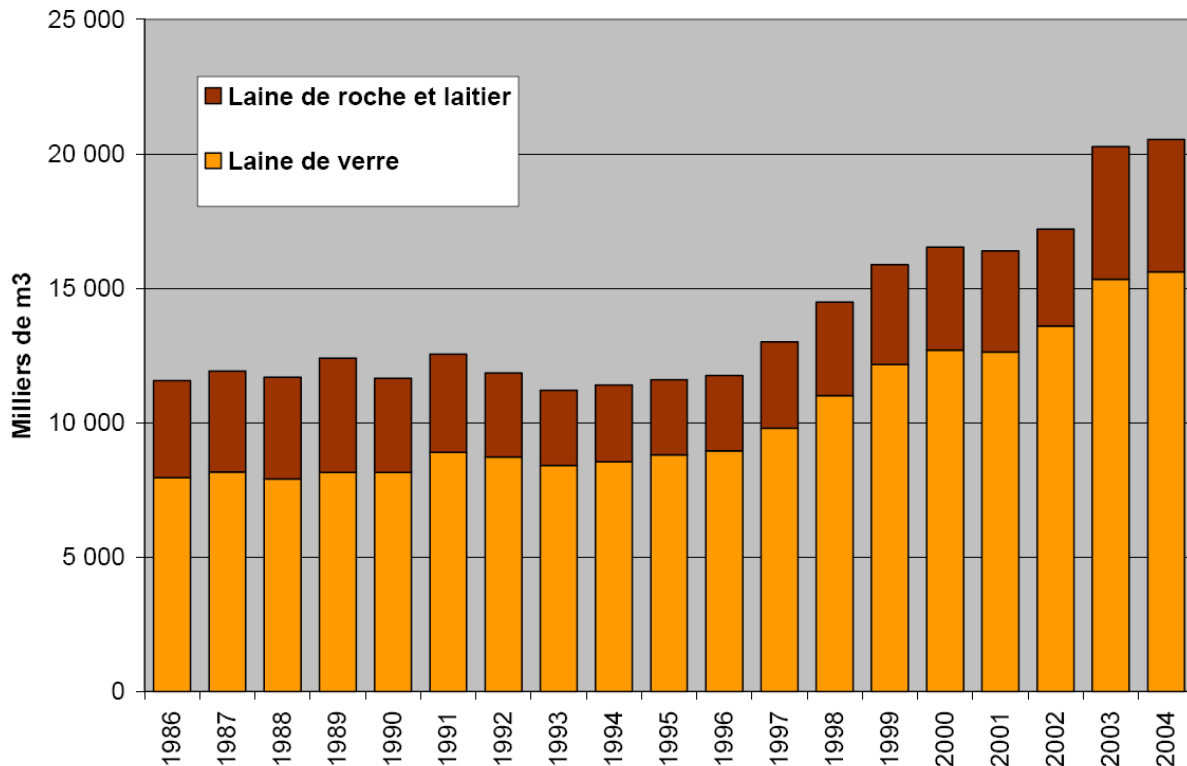


Figure 17: ventes de laines minérales (verre, roche, laitier) en m³ entre 1982 et 2004 (FILMM, 2007)

Les industriels rappellent que le volume diffère largement du tonnage en raison de la nature et de la masse volumique des produits. Depuis quelques années, en raison des exigences réglementaires, les performances s'accroissent en termes d'épaisseur, de résistance thermique ou de conductivité thermique. Ces nouvelles performances explicitent les distinctions entre les diagrammes exprimés l'un en tonnes et l'autre en m³.

Eurisol, fabricant de produits isolants projetés, estime que le volume de production de produits de flocage fibreux (les industriels préfèrent employer le terme de projection) en France s'élève entre 45 000 et 50 000 tonnes par an. Ce chiffre est actuellement en forte augmentation (environ 15 % par an).

3.1.8 Les transformateurs et utilisateurs de laines minérales

3.1.8.1 Utilisation selon leur présentation

Les laines minérales se présentent sous divers aspects afin de répondre à des conditions d'utilisation précises, sous forme :

- de feutres, soit en rouleaux panneaux rigides ou semi-rigides nus soit revêtus de papier kraft, kraft-aluminium, aluminium, voile de verre, tissu de verre
- de coquilles pour canalisations encollées et préformées en cylindres annulaires qui peuvent être moulés ou découpés nues ou revêtues
- de produits lamellaires, des produits moulés... pour intégrateur,
- sous forme de complexes de doublages de dalles de plafonds, de bourrelets (corde contenue dans une gaine tressée)
- de produits en vrac sous forme de nodules issus de panneaux ou de rouleaux qui peuvent être conditionnés en interne ou chez un transformateur, qui va les carder, sous forme de flocons (éventuellement ajouter, un traitement anti-poussières) les conditionner en sacs, en vue de leur mise sur le marché pour le soufflage mécanique dans les combles ou les murs creux. Lors du soufflage ou insufflation, la laine sèche en flocons est soufflée mécaniquement par de l'air :
 - sur les sols des combles perdus afin de former un matelas de l'épaisseur et de la résistance thermique voulue ;
 - dans des espaces clos d'épaisseur réduite, entre deux murs par exemple.
- des fibres en balles pour la vente à des transformateurs qui y ajoutent des liants hydrauliques ou plâtre en vue de la projection par voie humide. La projection requiert une qualification particulière du personnel.

Lors de la projection, le produit final est fabriqué sur place à l'épaisseur demandée. L'opérateur projette le mélange humide de fibres et de divers adjuvants. Celui-ci adhère directement au support, préalablement imprégné d'un primaire accrochage.

La figure 18 évoque le soufflage de laines minérales sous formes de flocons.



Figure 18: illustration du soufflage de laines minérales (Johns Manville company 2008)

Le FILMM souligne que les laines minérales de verre et de roche en flocons sont destinées à l'isolation des combles perdus à faible pente ou aux charpentes fermettes industrielles. Elles sont vendues sous forme de nodules comprimés en sacs. La part de l'isolation en vrac soufflé apparaît faible pour la thermique industrielle.

Pour la projection, l'application majeure concerne les sous faces des planchers des bâtiments collectifs résidentiels et non résidentiels (parkings souterrains par exemple). L'intérêt réside dans l'adaptation homogène de la laine minérale au relief des parois et au

mélange laine/ciment dont les performances de résistance au feu sont élevées. Cette application implique majoritairement de la laine de laitier (à plus de 90 %) en vue d'assurer l'isolation thermique du site (70 % de ce type d'application en France en couche épaisse avec une masse volumique moyenne) ou une protection contre l'incendie (30 % de ce type d'application en France en fine couche très dense pour protéger la structure). La projection (ou flocage) de laines minérales est apparue dans les années 1970 afin de substituer les flocages d'amiante. Elle connaît depuis une augmentation continue en termes de tonnage, consécutive notamment au renforcement de la réglementation sur l'isolation. La France apparaît le plus important utilisateur européen de ce type de technique devant l'Espagne et loin devant l'Allemagne et l'Italie. Les industriels notent que la technique de projection est également très employée en Amérique du Nord et émerge en Russie et les pays de l'Est.

Pour les applications bâtiment, les panneaux et les rouleaux constituent 90 % du marché avec des applications similaires mais une facilité d'usage différente (FILMM, 2007).

La figure 19 illustre les diverses présentations sous lesquelles les laines minérales peuvent être commercialisées.



Figure 19: diversité des présentations proposées pour les laines minérales (FILMM, 2007)

Le lancement des feutres à dérouler date des années 1950.

Le FILMM (2007) estime que les laines de verre commercialisées se présentent à 75 % sous forme de rouleaux et 15 % sous forme de panneaux. Au contraire, les présentations concernant les laines de roche connaissent une répartition inverse ; à savoir, 15 % sous forme de rouleaux et 75 % sous forme de panneaux.

Les feutres ou panneaux sont agrafés, collés, fixés mécaniquement ou déroulés (sur les sols)... Certains produits sont cousus ou collés sur du papier bitumé, de la feuille d'aluminium... (INRS, 2001). Les coquilles ou calorifugeages sont en général retenus par cerclage (Inserm, 1999).

3.1.8.2 Les acteurs

Le marché français de l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment est caractérisé par un petit nombre de fabricants et de transformateurs et un grand nombre d'entreprises réalisant de l'installation. Les fabricants de matériaux isolants regroupent principalement des groupes internationaux ainsi que des acteurs à dimension nationale.

Selon les professionnels du secteur, la plupart des installateurs intervient indifféremment dans le secteur résidentiel et non résidentiel (MSI 2006). Toutefois, certains installateurs sont spécialisés dans la réalisation d'ouvrages spécifiques. Les entreprises spécialisées dans l'isolation thermique de bâtiment sont concurrencées par les entreprises générales. En

effet, les entrepreneurs de maisons individuelles requièrent des entreprises qualifiées pour la pose d'isolants thermiques.

Le marché français de l'isolation thermique dans le secteur autre que le bâtiment est caractérisé par un nombre important d'installateurs. Selon les professionnels du secteur, les entreprises présentes sur ce secteur regroupent des activités de transformation et d'installation. Certaines entreprises sont spécialisées dans la transformation et l'installation de produits particuliers comme les mousses polyuréthane élastomères ou les laines minérales. Toutefois, la plupart des installateurs s'avèrent compétents pour l'installation d'une grande partie des matériaux présents sur le marché. Selon les professionnels du secteur, la forte concurrence a poussé les entreprises à se développer sur les marchés limitrophes de la France.

Les branches du bâtiment, du tertiaire, de l'industrie utilisant ces matériaux font appel à des entreprises qualifiées. En France, chaque spécialité correspond à une qualification «QUALIBAT» : calorifugeage des tuyauteries et appareils (711); Isolation thermique par intérieur (712); Isolation thermique par extérieur (713); Isolation thermique et acoustique par projection, insufflation, injection (714); Isolation traitements acoustiques par plafonds tendus (715); Isolation anti-vibratile des sols et massifs (716); Isolation frigorifique locaux bâtiments ciments (717) ou Isolation par planchers surélevés (718) (Inserm, 1999).

Selon les professionnels du secteur, les sociétés opérant dans le secteur industriel se situaient proche de bassins industriels importants, notamment les ports, les installations pétrochimiques, les laboratoires pharmaceutiques, les centrales thermiques ou nucléaires (MSI, 2006).

La distribution des matériaux d'isolation thermique en France s'opère par plusieurs circuits de distribution, incluant les négoce généralistes et spécialistes du bâtiment, les grandes surfaces de bricolage et la vente directe. Selon MSI, les négoce généralistes représentaient 77 % du marché de l'isolation thermique en volume pour l'année 2004. Les grandes surfaces de bricolage comptaient pour 11 % du total, suivi par les négoce spécialisés avec 10 %. Les 2 % restants étaient attribués à la vente directe. Selon les professionnels du secteur, le développement des grandes surfaces de bricolage s'est traduit par une baisse de la part des négoce généralistes. En effet, les fabricants commercialisent des produits plus faciles à poser destinés à une installation par les particuliers. Par ailleurs, l'intérêt des ménages pour le bricolage a poussé les grandes surfaces de bricolage à développer l'activité « isolation » de leurs magasins. Selon les professionnels du secteur, les produits les plus couramment distribués en grande surface de bricolage étaient les laines minérales sous forme de rouleaux.

La distribution des produits d'isolation thermique s'opère différemment selon le secteur du bâtiment et de l'industrie. La distribution des matériaux d'isolation thermique dans le secteur du bâtiment était principalement assurée par les négociants généralistes en 2004, ces derniers représentant 86 % du total. La même année, la part des grandes surfaces de bricolage était de 11 % du marché français de l'isolation thermique pour le bâtiment. Les 3 % restants étaient attribués à la vente directe.

La distribution de produits d'isolation thermique dans le milieu industriel est essentiellement assurée par les négociants spécialisés, représentant 97 % du volume total du marché de l'isolation thermique dans le secteur industriel en 2004. Les 3 % restants étaient attribués aux ventes directes.

Le choix de circuit de distribution varie selon le secteur du bâtiment et le secteur industriel. Les principaux groupes intervenant dans la distribution de produits d'isolation dans le secteur du bâtiment incluent :

- Bigmat
- Bricomarché
- Gedex Gedimat
- Groupe Castorama
- Groupe Point P
- Leroy Merlin
- PBM

Les principaux intervenants dans la distribution de produits d'isolation à destination du secteur industriel incluent SFIC et ISOPAR, filiale du groupe Point P et Ouest Isol.

Ce chapitre illustre la multiplicité des acteurs impliqués de la production à la pose. La figure 20 évoque tous les intervenants impliqués dans la projection (ou flocage) de laines minérales.

Les intervenants

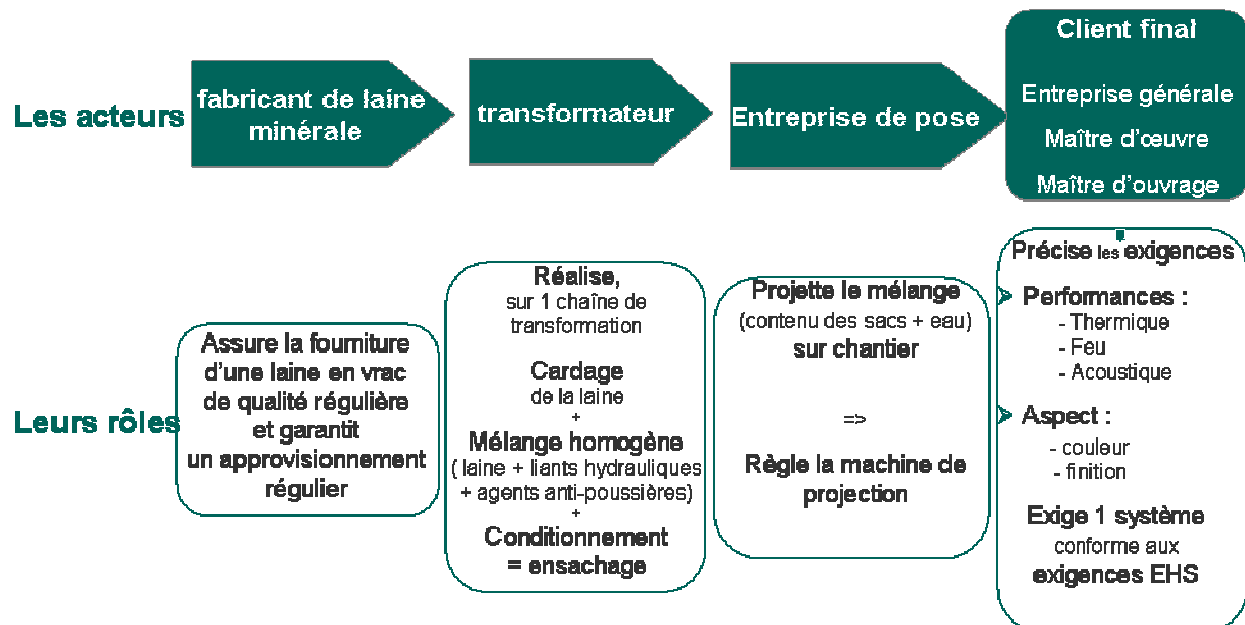


Figure 20: intervenants impliqués dans la projection de laines minérales (Saint Gobain 2007)

3.1.8.3 Domaines d'applications

3.1.8.3.1 Propriétés des laines minérales

Les laines minérales répondent favorablement aux exigences requises, notamment réglementaires, en termes d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie.

La structure des laines minérales réduit la convection en retenant l'air dans la matrice de la laine. L'air parfaitement immobile est un bon isolant, sa conductivité est de 25mW/mK. Les laines minérales arrêtent aussi le rayonnement et la conduction de la chaleur. L'efficacité des laines minérales, lorsqu'il s'agit de diminuer le transfert de chaleur, dépend de ses propriétés structurelles comme la masse volumique, l'épaisseur, la composition et la finesse des fibres de même que la température à laquelle celle-ci est utilisée.

La structure poreuse à cellules ouverte et élastique des laines minérales diminue la résistance au passage de l'air comprise entre les deux parois, augmentant ainsi la performance acoustique du système. Grâce à leur élasticité, les laines minérales permettent une parfaite désolidarisation entre chape et dalle pour traiter efficacement les bruits de choc. De même, grâce à leur porosité qui piège les ondes sonores, les laines minérales sont utilisées comme absorbant acoustique en plafonds ou en parois verticales dans les systèmes masse-ressort-masse.

Les laines minérales sont des matériaux de protection incendie efficaces car les matières premières ne sont ni combustibles ni conductrices de chaleur. En cas d'incendie, la laine minérale n'alimente pas l'incendie, évite la propagation des flammes et ne contribue pas au dégagement des fumées et de leur opacité, ni à l'émission de gaz toxiques (FILMM). Elle est

donc naturellement utilisée dans les systèmes de construction pour contribuer à la performance de stabilité au feu, de pare-flamme ou de coupe-feu. Elle est particulièrement adaptée pour des applications à risque et la protection des structures des bâtiments, le recouvrement de plafonds, les cloisons coupe-feu l'inclusion dans les portes coupe feu, la protection des façades et des planchers.

Les principes de l'isolation thermique, acoustique et la protection incendie sont détaillés en annexe 5.

Les laines minérales présentent d'autres propriétés recherchées impliquant notamment :

- La souplesse et l'élasticité ; élément fondamental de la bonne mise en œuvre et de l'efficacité des systèmes, l'élasticité permet un très bon calfeutrement des parois et des jonctions pour limiter les ponts thermiques et s'adapter à toutes les irrégularités du support.
- La légèreté ; elle facilite la mise en œuvre et réduit la fatigue due à la manipulation des matériaux au travail.
- L'imputrescibilité, elle est indispensable à la durabilité dans la construction, le produit va être laissé tel quel pendant des dizaines d'années et ne doit donc pas se dégrader ni favoriser la prolifération de micro-organismes.
- La cohésion mécanique, la résistance à la compression, le comportement à l'eau et à la vapeur d'eau, le fluage long terme... sont autant de caractéristiques qui doivent être vérifiées avant de faire le choix des produits en fonction de l'ouvrage dans lequel l'isolant va être inséré.

Les laines minérales d'isolation sont surtout utilisées pour l'isolation thermique, l'isolation acoustique, la correction acoustique et la protection incendie des parois et systèmes.

3.1.8.3.2 Applications

Dans les logements, elle est utilisée pour l'isolation des combles, des murs, des sols, des planchers, des plafonds, des toitures (sèches métalliques, étanchées sur bac acier ou étanchées sur maçonnerie), des cloisons, des terrasses, et incorporée aux appareils électroménagers (réfrigérateurs, cuisinières domestiques, et une grande variété d'autres appareils et équipements).

La laine minérale isolante est surtout utilisée pour l'isolation thermique, acoustique et la protection incendie (valves, clapets, portes coupe-feu). Ses applications sous forme d'isolants sont largement répandues dans le bâtiment, l'aéronautique, la construction navale, la production d'électricité et d'autres secteurs d'activité.

Elle est également employée afin de renforcer le ciment et le mortier, et sous forme de revêtement pour tuyauteries, conduits de ventilation, systèmes de chauffage (chaudières, fours) et équipements de réfrigération. Dans les logements, elle est utilisée pour l'isolation des combles, des murs, des sols, des planchers, des plafonds, des toitures (sèches métalliques, étanchées sur bac acier ou étanchées sur maçonnerie), des cloisons, des terrasses, et incorporée aux appareils électroménagers (réfrigérateurs, cuisinières domestiques, et une grande variété d'autres appareils et équipements). Les applications concernent principalement les bâtiments mais peuvent inclure les véhicules réfrigérés, les trains, les navires ou les avions. Elle s'emploie également en acoustique et sous forme de substrat en horticulture (Saint Gobain 2007).

La distinction d'usage entre les laines de verre et les laines de roche n'apparaît pas clairement et dépend de nombreux paramètres. Ainsi, la laine de verre ne présente pas d'applications fondamentalement divergentes de celles des laines de roche. Certaines tendances peuvent néanmoins être relevées, à titre d'exemple, lorsque l'isolant est posé en

murs et toitures, le calfeutrage devient primordial et la souplesse de la laine de verre peut s'avérer une solution d'isolation privilégiée. En revanche, si l'isolant doit apporter une résistance importante au feu ou à la compression (en sols et en supports d'étanchéité), la laine de roche sera généralement préférée. Les laines de laitier et les laines de roche sont extensivement employées pour l'isolation résidentielle beaucoup plus en Europe qu'aux Etats-Unis (IPCS / WHO 2000).

La figure 21 illustre les principaux secteurs d'utilisation en indiquant la localisation de l'isolant et sa fonction.

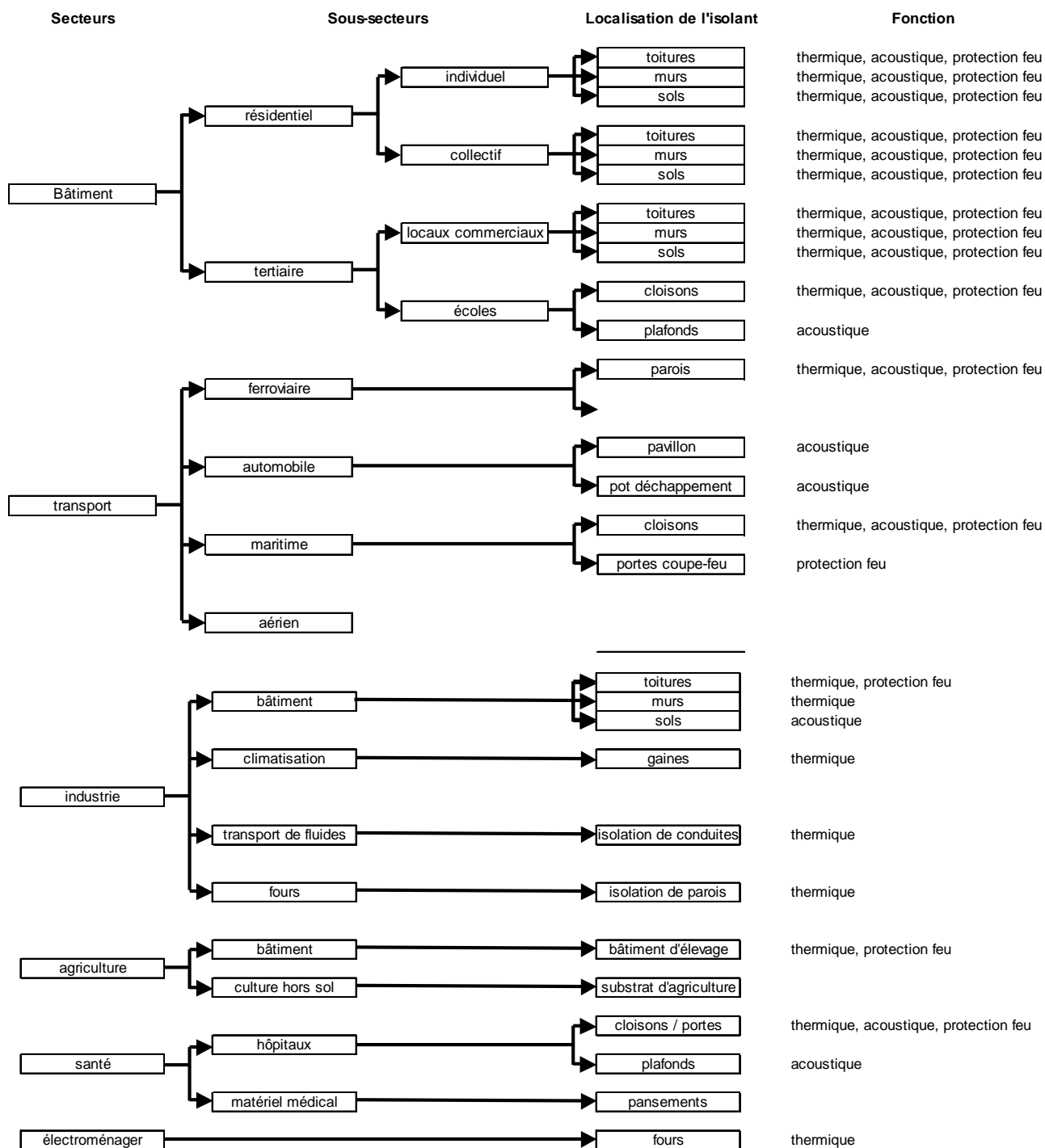


Figure 21: présentation des secteurs d'utilisation des laines minérales associant la localisation de l'isolant et sa fonction (CSHPF, 2004)

3.1.8.3.3 Description pour les bâtiments résidentiels et tertiaires

L'isolation des logements et d'autres bâtiments, notamment tertiaires contre la perte de chaleur, représente la plus large utilisation des laines de verre, de roche et de laitier ; soit plus de 70 % de la production industrielle destinée à cette application (EURIMA 2008).

L'isolation par les laines minérales concerne les combles perdus ou aménagés, les planchers, les dalles flottantes, les fonds de coffrage et les planchers chauffants mais aussi les murs, les cloisons, les plénums, les équipements de chauffage et de climatisation, les toitures, terrasses... (FILMM, 2007).

L'avis du CSHPF (2004) développe les divers usages des laines minérales applicables aux bâtiments :

- Isolation en comble perdu inaccessible (soufflage) ;
- laine de verre ou de roche, nodulée en flocons ou, laine en vrac ;
- Isolation des combles perdus ou aménagés par panneaux ou rouleaux ;
- Isolation des toitures, des terrasses (en dessous étanchéité) ;
- panneau isolant en laine minérale recouvert d'un voile ou d'une grille de verre ;
- panneau isolant thermique rigide pouvant être constitué de laines de roche ;
- panneau de laine de roche nu ou revêtu d'une grille de verre avec bitume, rebordé ou non ;
- Isolation en sous-face de toitures métalliques (en rampant) ;
- rouleaux ou panneaux en laine de verre ou de roche revêtus d'un voile de verre ou d'un pare vapeur ;
- pour les toitures métalliques non-accessibles : panneaux rigides en fibres de roche revêtus d'un voile de verre et d'un kraft à la surface.

Pour les toitures, l'isolation comprend l'isolation par l'intérieur, par l'extérieur ou sarking et la toiture-terrasse. Selon les professionnels du secteur, l'isolation des toitures par l'intérieur reste prédominante pour la période d'analyse du cabinet MSI (MSI, 2006). Elle s'effectue par l'application d'un isolant sur une charpente traditionnelle ou de fermettes. La distinction doit également se faire entre l'isolation des combles perdus et aménageables. Les combles perdus sont des toitures inclinées non habitées et non chauffées, séparées par une barrière isolante avec les pièces habitables. Les combles perdus peuvent se présenter sous forme de planchers ou de solives.

L'isolation des toitures concerne également les combles aménageables ou habitables. Selon les professionnels du secteur, la solution d'isolation est différente des combles perdus, en particulier dans le type de matériau et dans sa forme. En effet, l'utilisation de rouleaux et de panneaux semble préférée au vrac pour des raisons de performances thermiques et de propriété mécanique.

Le sarking est un procédé d'isolation thermique de toitures inclinées caractérisé par la pose de panneaux isolants rigides au dessus des chevrons ou fermettes. Selon les professionnels du secteur, ce procédé était moins utilisé par les installateurs. En effet, les habitudes de construction de bâtiments et son coût supérieur ne facilitent pas le développement de ce procédé. Toutefois, l'isolation des toitures par l'extérieur est beaucoup plus présente dans les logements individuels que dans des bâtiments non résidentiels. Ce procédé semble privilégié pour traiter un nombre plus important de ponts thermiques et se destine principalement pour des régions définies par une forte amplitude thermique. A titre

d'exemple, l'isolation par l'extérieur est fréquemment utilisée pour l'isolation de bâtiments situés en haute montagne comme les chalets.

La figure 22 illustre les trois modes d'isolation des combles, l'une pour l'isolation des combles perdus par des rouleaux (a), l'autre pour l'isolation des combles rampants par des panneaux (b) et enfin la dernière par une isolation à l'aide de flocons par insufflation mécanique (c).

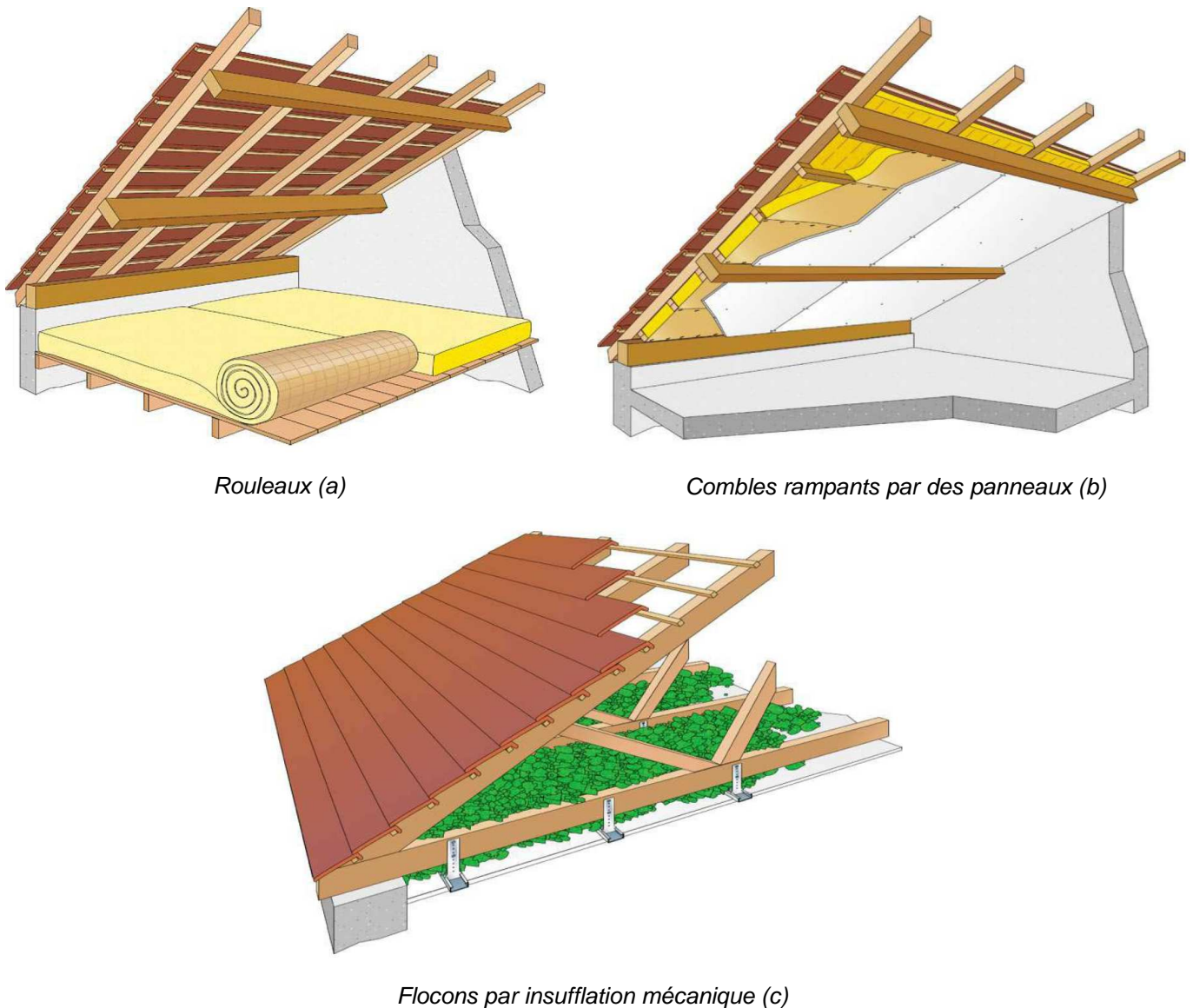


Figure 22: illustration des trois modes d'isolation des combles par les laines minérales (FILMM, 2007)

Les autres usages développés par le CSHPF (2004) incluent :

- isolation par insufflation dans les murs creux
- laine de verre ou de roche en nodules.
- isolation intérieure ou extérieure de parois lourdes (doublages et bardages)
- sous enduit hydraulique extérieur : panneau de laine de roche,
- pour les parois verticales et murs en contre-cloison ou sur ossatures ou par complexe de doublage : panneaux rigides ou rouleaux de laines de verre ou de roche revêtus ou non d'un pare vapeur ou d'une plaque de plâtre associée en usine,

- pour le bardage simple peau : panneau rigide ou rouleaux en laine de verre ou de roche, revêtu ou non d'un pare vapeur kraft aluminium renforcé d'un voile de verre ;
- pour le bardage double peau : rouleaux ou panneaux de laine de verre ou de roche nus ou revêtus d'un voile de verre (1 ou 2 couches) ou d'un pare vapeur ;
- Isolation des cloisons ;
- pour les cloisons distributives et séparatives : panneau ou rouleau en laine de verre ou de roche inséré entre deux parois de parement en plâtre ;

Selon les professionnels du secteur, l'isolation des murs par l'intérieur représentait 95 % du marché total des murs en 2004 (MSI, 2006). Ceci s'explique par les habitudes de construction des entreprises françaises. D'autre part, le coût de revient de ce type d'isolation est beaucoup moins élevé qu'une isolation par l'extérieur. Le principal inconvénient reste la réduction de la surface habitable due à l'épaisseur de l'isolant posé.

- Isolation sous plancher ou en plénum ;
- laines de verre ou de roche en rouleaux ou en panneaux ;
- Isolation sous dalle flottante, sous face de planchers, sous revêtement de sol ;
- certains revêtements manufacturés à base de PVC contiennent des voiles de verre tissés ou non, placés au milieu du revêtement ;
- panneaux de laine de verre ou de roche sous dalle flottante ; panneaux de laine de roche posés en fond de coffrage ou fixé mécaniquement ;
- Isolation en plancher accessible en sous face ;
- panneau ou rouleau semi-rigide en laine de verre ou de roche, nu ou revêtu sur une face d'un kraft bitumé pare vapeur ou d'un voile de verre ;
- panneau de laine de roche de haute densité ;
- Isolation en plancher à solive ;
- rouleaux ou panneaux en laine de verre ou de roche revêtus ou non d'un pare vapeur ;
- feutre en laine de roche entre deux papiers dont l'un est pare vapeur ;

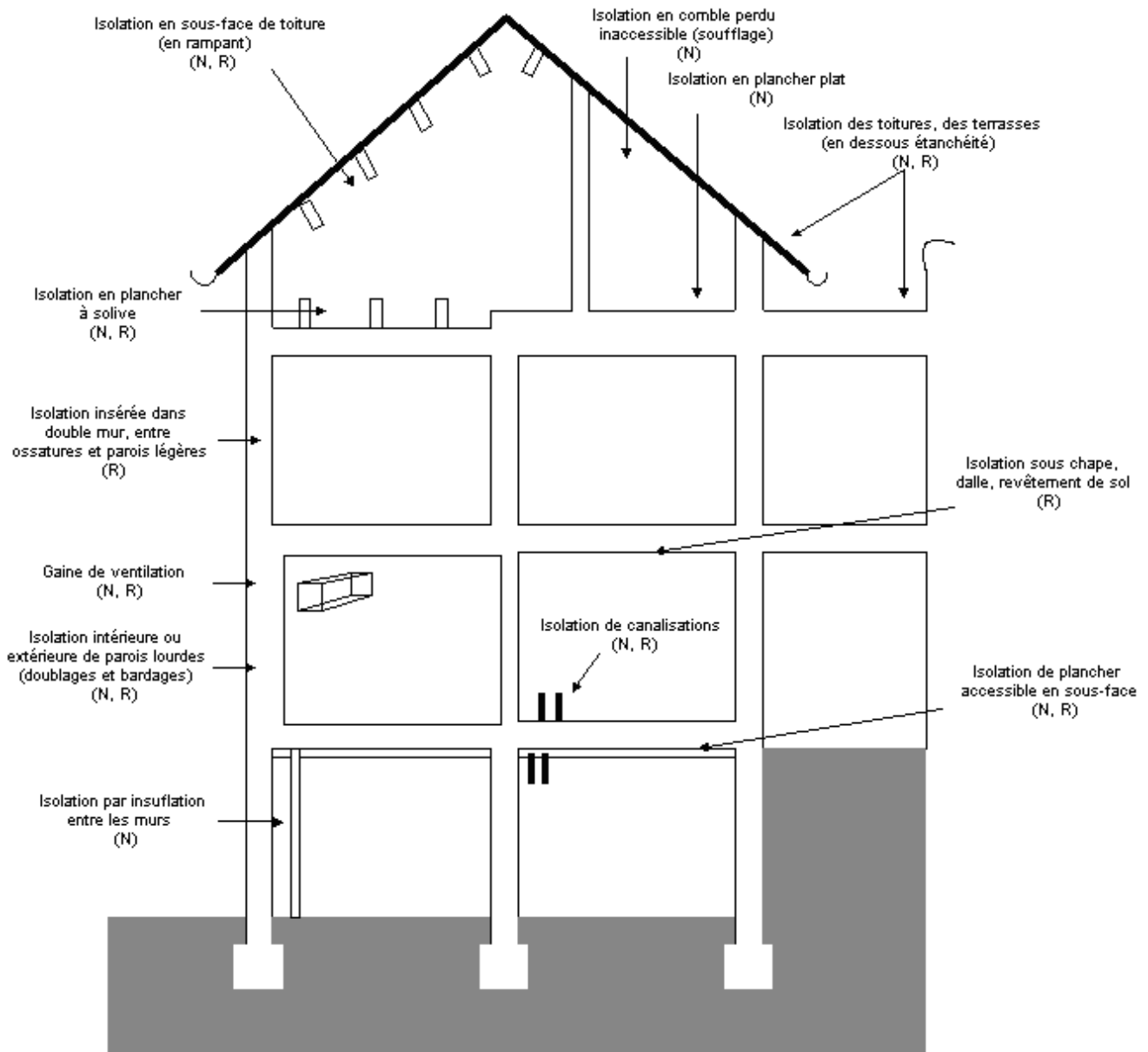
L'isolation d'un plancher peut s'effectuer sous ou sur les solives. Selon les professionnels du secteur, l'isolation des planchers sur les solives est une opération moins coûteuse, du fait de la rapidité et de la facilité de pose, contrairement à l'isolation sous les solives. L'isolation des sols peut s'effectuer par le dessous ou le dessus. L'isolation par le dessous s'adresse généralement pour les sols en béton ou en bois. L'application de l'isolant se fait par fixation avec des pattes. Par ailleurs, la technique d'isolation peut varier selon la nature du plancher et de sa composition. A titre d'exemple, la présence d'un vide sanitaire très humide nécessite la mise en place d'un matériau résistant à l'absorption d'eau à long terme. L'isolation par le dessus est plus pratique et s'adapte plus facilement pour des travaux d'entretien-rénovation, en posant directement sur le sol en béton les isolants principalement sous forme de panneaux.

- Isolation des canalisations et équipements de chauffage et de climatisation ;
- laine de verre ou de roche revêtue ou non ;
- coquille en laine de verre ou de roche revêtue ou non ;
- bourrelet en laine de verre ou de roche renforcé de fil métallique ;

- Isolation des conduits de climatisation et conduits auto portants
 - pour l'isolation extérieure des conduits : panneaux ou rouleaux en laine de verre ou de roche revêtus et d'un parement en aluminium renforcé sur l'une et l'autre face d'un voile,
 - pour l'isolation interne des conduits : panneaux en laine de verre ou de roche, revêtus d'un tissu de verre ou d'aluminium.

Les systèmes de chauffage, de ventilation et de conditionnement d'air dans les bâtiments devraient être généralement isolés. Cette isolation est nécessaire pour faire en sorte que l'eau et l'air qui circulent restent chauds ou pour maintenir l'eau de refroidissement à basse température et éviter ainsi la condensation et de réduire les consommations d'énergie (Eurima, 2008).

La figure 23 illustre l'emplacement éventuel de produits d'isolation à base de laines minérales dans le bâtiment.



N : matériau isolant nu ; R : matériau isolant revêtu

Figure 23: exemples d'emplois de produits d'isolation à base de laines minérales dans le bâtiment (CHSPF, 2004)

Le tableau 14 présente selon le type de laines minérales une liste non exhaustive des applications potentielles associées.

Tableau 14: exemples d'application par type de laines minérales (TIMA, 1991)

| <i>Laine de verre</i> | <i>Laine de roche et de laine de laitier</i> |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • <i>Isolation des bâtiments industriels et commerciaux</i> • <i>Isolation des bâtiments résidentiels</i> • <i>Isolation des conduits de traitement d'air</i> • <i>Isolation des équipements de thermique industrielle</i> • <i>Isolation pour les plafonds (plafonds et plénums)</i> • <i>Panneaux de plafond</i> • <i>Panneaux de correction acoustique</i> • <i>Média de croissance pour l'horticulture</i> | <ul style="list-style-type: none"> • <i>panneaux de plafond</i> • <i>Panneaux de correction acoustique</i> • <i>Protection incendie des parois</i> • <i>Isolation des bâtiments résidentiels</i> • <i>Isolation des bâtiments industriels et commerciaux</i> • <i>Isolation des équipements de thermique industrielle</i> • <i>Média de croissance pour l'horticulture</i> |

La laine de laitier est réservée à la projection.

3.1.8.3.4 Description pour l'industrie

Il existe un large éventail d'applications pour les laines minérales dans l'industrie, depuis les tuyaux calorifuges, pour le transport des fluides, jusqu'aux systèmes de climatisation. Leur flexibilité, leur durabilité et la gamme des formats permettent leur utilisation dans de nombreuses situations. Les applications sont multiples et une liste exhaustive ne paraît pas envisageable. La diversité des usages inclut entre autre les applications industrielles communes figurant dans le tableau 15.

Tableau 15: secteurs industriels et applications communes des laines minérales (site EURIMA, 2007 ; rapport du RISE)

| Secteurs industriels | Exemples d'applications |
|--|---|
| centrales thermiques | isolation et étanchéité |
| chantiers navals et installations critiques maritimes | isolation anti-incendie et acoustique des navires et des plateformes pétrolières |
| installations électriques | par exemple pour le tirage et le passage de câble |
| entretien des chaudières et des turbines | isolation et étanchéité |
| isolation des équipements ou des conduites | flocage et isolation |
| calorifuge industriel | <u>Parois planes</u> Isolation des cuves et réservoirs de grande dimension Isolation des étuves, appareils et fours Isolation des cavités de fours ou enceintes métalliques |
| | <u>remplissage de cavités</u> Isolation des cuves et réservoirs de grande dimension |
| | <u>Parois courbes</u> Isolation des cheminées et tuyauteries Isolation des cuves et des citernes roulantes Isolation des cheminées industrielles : |
| | <u>Tuyauteries industrielles</u> Isolation thermo-acoustique et calorifugeage des tuyauteries par coquilles Isolation thermo-acoustique et calorifugeage des tuyauteries par nappes grillagées Isolation thermo-acoustique et calorifugeage des tuyauteries par nappes alu |
| | |
| | |
| maintenance mécanique | par exemple en chaudronnerie pour l'étanchéité |
| Aérospatiale, automobile | Isolation de la cabine |

Pour les tuyauteries, la mise en œuvre est plus rapide et la performance meilleure en utilisant des éléments cylindriques en laine de verre ou de roche à structure concentrique (coquilles), par rapport à d'autres formats d'isolants (nappes ou rouleaux) nécessitant un façonnage. Les coquilles de très gros diamètre sont utilisées en caniveaux pour leur légèreté et leur facilité de mise en œuvre (cas de lieux exigus). La protection du calorifuge peut être réalisée avec des tôles, des enduits, en PVC ou avec un surfaçage aluminium mis en place en usine selon les exigences esthétiques, pratiques, mécaniques, économiques... Plus les diamètres sont importants, plus les épaisseurs doivent être conséquentes, afin d'assurer à température égale de process une performance homogène. Les producteurs européens de laine minérale ont ainsi également développé des produits adaptés à des utilisations et des environnements très spécifiques. Par exemple, les produits d'isolation techniques qui peuvent fonctionner dans des conditions de température d'emploi allant jusqu'à 900 °C pour les tuyauteries industrielles, les chaudières des centrales électriques et les gaz de fumée (FILMM, 2002).

La figure 24 illustre l'isolation de tuyauteries et d'une étuve ou d'un four grâce à un doublage de laines minérales.

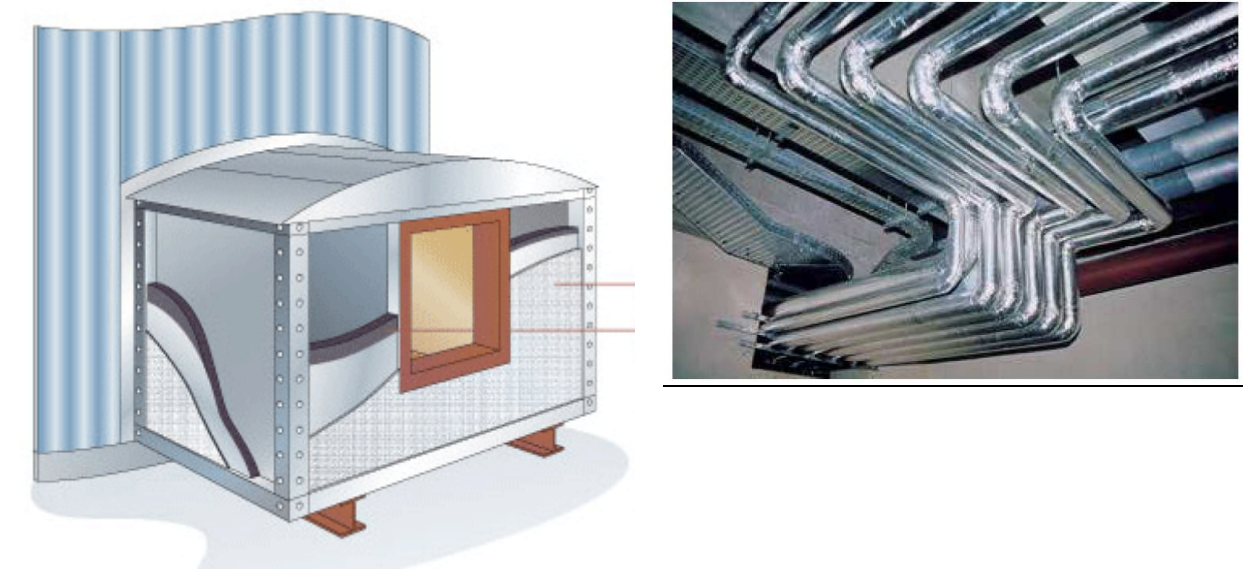


Figure 24: isolation de tuyauteries et d'une étuve ou d'un four grâce à un doublage de laines minérales (FILMM, 2007 ; Saint Gobain, 2008)

Dans le domaine de l'industrie, des bâtiments industriels et commerciaux, l'isolation par les laines minérales concerne les toitures terrasses, les plafonds suspendus et les sous-toitures (FILMM, 2002).

3.1.8.3.5 Autres

Les laines minérales sont employées également dans d'autres applications plus atypiques incluant :

- Les cultures hors sol (agent favorisant la pousse et comme traitement du sol en agriculture, surtout pour les légumes et les fleurs),
- Les écrans routiers antibruit,
- Les chambres sourdes,
- Le renforcement de produits bitumineux, de ciments, de matériaux composites...

La figure 25 représente une laine minérale employée pour une culture hors sol.



Figure 25: laine minérale employée pour une culture hors sol (FILMM, 2007)

Les véhicules et les engins de transport (voiture, bateau, avion, navette spatiale) ont également intégré des laines de verre ou de roche pour améliorer leurs performances et pour apporter les conditions thermiques et acoustiques adéquates pour les marchandises ou les passagers devant être transportés. Les laines de roche et de verre sont parfois utilisées comme barrière acoustique le long des autoroutes ou des voies ferrées (IARC, 2002).

3.1.8.3.6 Répartition des applications

Le marché de la laine de verre ou de roche concerne principalement l'isolation des bâtiments, notamment la toiture, les murs, les plafonds et les sols (TIMA, 1991). En effet, l'isolation des bâtiments absorbe les trois quarts des 16 millions de mètres cubes de laines de verre, de roche ou de laitier vendus annuellement en France. Les entreprises du bâtiment et des travaux publics en sont donc les principales utilisatrices (INRS 2008)

Le développement réel du marché des laines minérales date des années 1970. Depuis cette date, le FILMM note l'absence de nouvelles applications significatives en sus de l'isolation. De même, la répartition absolue entre les trois grands types d'application a peu évolué, à savoir :

- Le bâtiment représente 90 % des usages et concerne l'isolation des toits, des murs, des planchers et l'étanchéité pour le secteur des bâtiments résidentiels et non résidentiels ;
- Le calorifugeage des tuyauteries ou des équipements de thermique représente 5 % et concerne notamment l'isolation du chauffage collectif, des parties collectives des canalisations dans les immeubles ou les garages souterrains mais aussi le domaine industriel comme les équipements de transport de fluides des centrales nucléaires ou thermiques, les raffineries, la tuyauterie (conduites, ballons, réservoirs)...
- Les autres applications représentent 5 %. Ces dernières restent anecdotiques et ont toujours concerné un faible volume de laines minérales commercialisées. Elles incluent, entre autres, la projection, notamment pour la protection incendie des bâtiments en mélange avec des additifs (plâtres, ciment...), l'isolation phonique du capot moteur ou de l'habitacle dans le secteur de l'automobile, la culture hors-sol (support de laine de verre ou de roche sans ensimage en retenant l'eau et les nutriments nécessaires), les plaquettes de freins, les enrobés drainants (pour la voirie par exemple mais marché inexistant à l'heure actuelle), la filtration d'air (pré-filtres), l'isolation thermique des aéronefs, l'acoustique industrielle (baffles...), les faux-plafonds...(FILMM, 2007).

La figure 26 illustre la répartition des applications d'isolation impliquant les laines minérales dans le bâtiment. La catégorie « autres » inclut l'isolation des plénums et l'enrobage des gaines techniques.

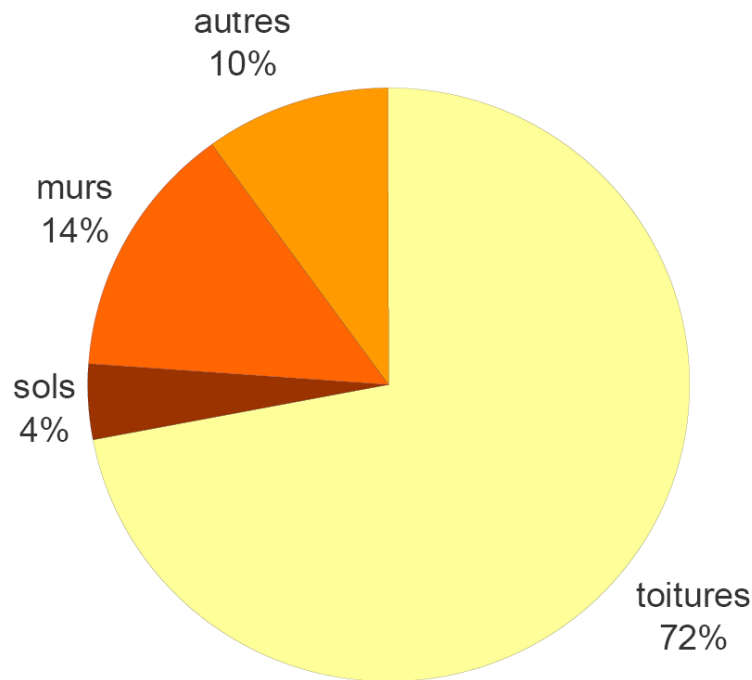


Figure 26: répartition de l'utilisation des laines minérales (FILMM, 2007)

Les laines minérales sont employées à 55% dans la rénovation.

La figure 27 illustre la répartition et l'évolution au cours du temps des applications relatives aux laines minérales.

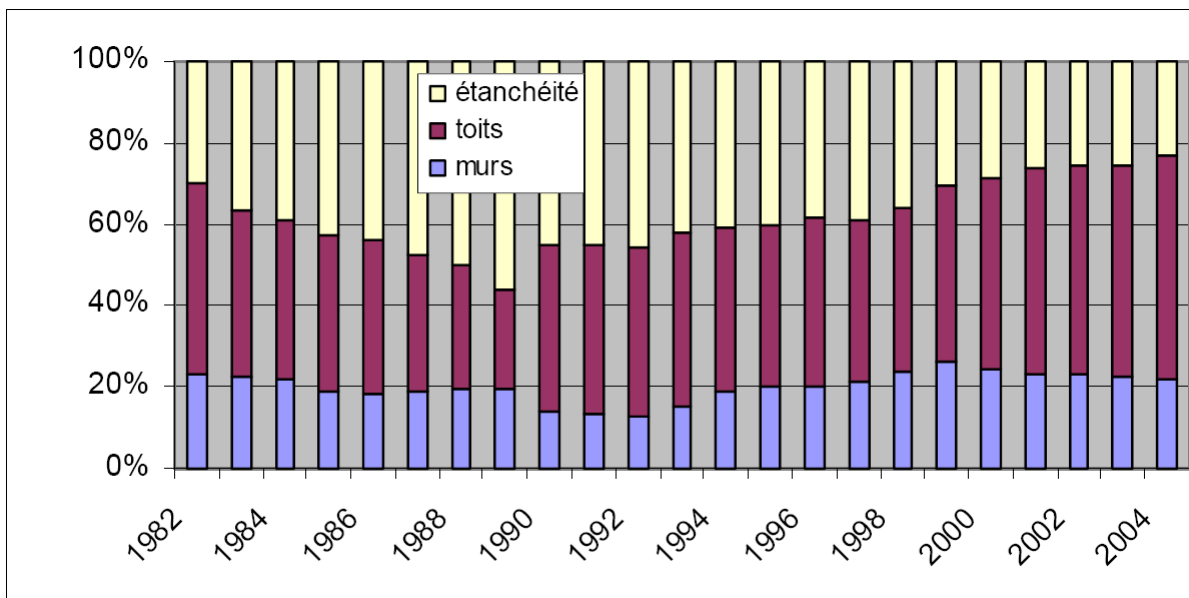


Figure 27: évolution historique des principales applications pour les laines minérales (FILMM, 2007)

Le terme « étanchéité » définit l'isolation au dessus d'une terrasse, d'un bac acier, d'une fixation de membrane pour faire étanchéité à l'eau....destiné à un toit plat de 0 à 5 % de

penne. D'après le FILMM, la laine de roche est la seule laine minérale utilisée pour cet usage.

Le terme « toit » définit la partie derrière le second œuvre de l'ouvrage dans les combles, sous les ardoises, les charpentes de couvertures de pente > 5 %...

Le terme de « mur » définit l'isolation des murs à l'extérieur, à l'intérieur, façade....

Pour ces deux applications « toit » et « mur », la laine de verre et la laine de roche se partagent le marché dans des proportions sensiblement équivalentes.

A titre indicatif, RPA (2007) présente la répartition des applications pour l'année 2004 au Royaume-Uni, soit 51 % pour l'isolation des toits et des combles ; 28 % pour l'isolation des murs ; 9 % pour les revêtements industriels et le reste pour des applications incluant la climatisation, la protection incendie, l'isolation acoustique ou des procédés industriels.

Les applications en diminution

Elles concernent l'intérieur des murs creux du fait que ce système constructif n'est plus répandu depuis la seconde guerre mondiale, tout comme l'isolation par l'extérieur qui n'est pas une technique de construction traditionnelle en France.

La laine de verre ou de roche constituait 80 % des isolants associés aux bardages en résidentiel en 1991. Les systèmes de bardages destinés à l'isolation thermique par l'extérieur sont apparus en France dans les années 1970, année du premier choc pétrolier, afin de réaliser des économies d'énergie sur les bâtiments anciens notamment du parc social. Cette technique qui a connu un développement notable de 1975 à 1985 souffre actuellement, à la fois de la faible progression de l'isolation thermique par l'extérieur sur le marché français, et de la concurrence des autres techniques d'isolation par l'extérieur, notamment par le polystyrène expansé (PSE).

Cependant, les laines minérales sont traditionnellement employées en isolation par l'intérieur des murs par complexes de doublage ou contre-cloison. De par leur performance en matière d'isolation acoustique, elles sont insérées aussi dans les cloisons de distribution à base d'ossatures métalliques et de plaque de plâtre.

Les applications durablement installées

Les laines de verre ou de roche sont employées majoritairement (95 % en neuf et près de 100 % en rénovation) pour le traitement des espaces sous toiture en maison individuelle et sous toiture en pente en logement collectif. Un autre facteur d'expansion est le développement des combles aménagés et des combles aménageables (ces derniers en maison individuelle uniquement) et, dans une moindre mesure, des plafonds rampants au détriment des combles perdus.

Ces combles perdus concernent actuellement environ 55 % des toitures en maison individuelle contre plus de 60 % au début des années 1990. Ils utilisent moins de surface d'isolants étant donné qu'ils sont placés en planchers.

Les applications émergentes ou en expansion

Ces applications découlent principalement de l'intérêt renouvelé pour l'isolation thermique, de modes nouveaux ou renouvelés du traitement du confort thermique (chauffage par le sol, climatisation) et des exigences et besoins accrus de confort acoustique (isolation thermique et acoustique des équipements et conduits de climatisation et de chauffage par exemple).

Par ailleurs, l'isolation des bardages métalliques augmente depuis la RT 2000 parce que les bâtiments non résidentiels et commerciaux sont soumis aux mêmes exigences que l'habitat en termes de réglementation.

Il est à noter la forte croissance des procédés de soufflage de laines minérales en vrac (nodules) sur les planchers de combles perdus depuis la fin des années 1990.

3.2 Classification européenne des laines minérales

Les laines minérales sont exonérées de la classification en tant que substance cancérigène par l'Union Européenne. Les laines minérales appartiennent, selon la directive 97/69/CE, au groupe des « fibres minérales artificielles vitreuses (de silicate) à orientation aléatoire, dont le pourcentage pondéral d'oxydes alcalins et d'oxydes alcalino-terreux ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}$) est supérieur à 18 % ». Dans ce cadre, les laines minérales ont fait l'objet de tests individuels réalisés par les industriels et conformes au protocole ECB/TM/26 UE, rév. 7, Note Q, de la directive 97/69/CE. Elles présentent une biopersistance inférieure aux valeurs limites imposées par la réglementation européenne pour l'exonération. Sur la base de ces tests, les industriels ont demandé et obtenu que l'ensemble des laines minérales disponibles sur le marché soit exonéré de la classification cancérigène européenne.

Cependant, selon la directive européenne 67/548/CE, elles restent classées irritantes pour la peau. Concernant les laines minérales de verre, de roche et de laitier sans liant, l'étiquetage doit comporter le symbole de la croix de Saint-André et la phrase de risque R38 (irritant pour la peau).

Les industriels fabricants de laines minérales ont mis en place une certification européenne pour garantir que les productions de fibres de laines minérales de verre, de roche et de laitier sont conformes à l'exonération prévue par la directive 97/69.

Cette certification EUCEB (EUCEB 2008) contrôle par tierce partie indépendante que la composition chimique pour les fibres produites en usines, est identique à celle de la fibre testée lors des études expérimentales. Les emballages des produits comportent un marquage de conformité EUCEB informant le consommateur de cette vérification.

Le FILMM souligne que cette certification est faite sur la base des connaissances des résultats de tests de bio-persistance et tiennent compte des variations de composition chimique inhérentes aux matières premières utilisées pour fabriquer les laines minérales. Les variations maximales pour les oxydes mesurés en comparaison aux fibres testées doivent être :

- Pour une concentration d'oxydes supérieure à 15 %, la variation maximale permise est de +/- 10 % avec un maximum de 2,5 % (par exemple, pour une concentration d'oxydes de 20 %, la variation peut s'étendre entre 18 et 22 %, pour une concentration d'oxydes de 40 %, la variation peut s'étendre entre 37,5 et 42,5 %) ;
- Pour une concentration d'oxydes égale ou inférieure à 15 % et supérieure à 2 %, la variation maximale permise est de +/- 1,5 % (par exemple, pour une concentration d'oxydes de 10 %, la variation peut s'étendre entre 8,5 et 11,5 %) ;
- Pour une concentration égale ou inférieure à 2 %, la variation maximale permise est de +/- 1 % (par exemple, pour une concentration de 1,5 %, la variation peut s'étendre entre 0,5 et 2,5 %).

Ces règles s'appliquent aux oxydes individuels ou aux sommes d'oxydes (par exemple, $\text{CaO} + \text{MgO}$ ou $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$). La composition chimique doit inclure au moins 98 % des oxydes d'origine. Pour certains oxydes (B_2O_3 , P_2O_5 , Al_2O_3 (si > 19 %)) ou sommes d'oxydes ($\text{CaO} + \text{MgO}$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), seule la limite minimale est pertinente. Pour d'autres oxydes (TiO_2 , Al_2O_3 (< 2 %)), seule la limite maximale est pertinente.

Par ailleurs, les laines minérales vendues en France se soumettent au règlement de certification des matériaux isolants ACERMI. L'association pour la certification des matériaux isolants (ACERMI), organisme officiel créé sous l'égide de l'AFNOR, du CSTB et du laboratoire national d'essais (LNE) a été mise en place en 1985. L'organisme est habilité à

délivrer le certificat apportant une information vérifiée et permettant le choix éclairé d'un isolant adapté à l'emploi.

Toute laine minérale faisant l'objet d'une demande de certification ACERMI doit préalablement prouver l'exonération selon la directive. Le règlement ACERMI précise notamment les éléments complémentaires relatifs aux laines minérales. Les fibres de laines minérales doivent avoir été exonérées du classement cancérigène selon les dispositions des notes Q ou R de la directive européenne.

Pour l'instruction de sa demande de certificat, l'industriel doit fournir dans son dossier technique:

- un rapport d'essai établi par un laboratoire indépendant, établissant l'exonération des fibres sur la base de la note Q ou de la note R,
- dans le cas d'un essai in-vivo et d'une exonération selon les critères de la note Q, le rapport d'essai doit préciser la composition chimique des fibres testées.

Afin de démontrer que les produits fabriqués sont constitués de fibres similaires à celles testées, les contrôles suivants sont réalisés après admission du produit :

- Le contrôle de la composition chimique ou du diamètre des fibres doit être réalisé au moins une fois par mois en interne pour chaque four dans chaque usine.
- Le contrôle de la composition chimique ou du diamètre des fibres doit être réalisé au moins une fois par an pour chaque four par un laboratoire indépendant.

L'application de ces dispositions sera vérifiée annuellement par le pilote lors d'un audit de suivi de l'unité de production. Si l'industriel dispose de contrôles par tierce partie relatifs aux clauses énoncées, l'ACERMI les prend en compte.

Ainsi, la recherche de produits de substitution n'apparaît en aucun cas pertinente au vu de la réglementation actuelle et le chapitre 3.3 se limite à une présentation des autres matériaux présents sur le marché français répondant aux mêmes caractéristiques thermiques ou d'aptitude à l'emploi que les laines minérales d'isolation. Le choix des matériaux d'isolation dépend explicitement d'un équilibre entre divers paramètres objectifs et subjectifs incluant notamment la performance thermique liée à la réglementation, l'aptitude à l'emploi, la qualité de service, le coût, les innovations technologiques, les habitudes et la facilité de pose.

3.3 Autres produits utilisés pour les mêmes applications

Cette partie, sous l'angle uniquement technique, s'attache à présenter les autres produits utilisés pour les mêmes applications que les laines minérales. Toutefois, les experts attirent l'attention sur le manque de données, voire l'absence de données pour nombre de ces matériaux, permettant de caractériser leur toxicité.

Les isolants thermiques utilisés dans le secteur du bâtiment doivent être conformes à la norme européenne les concernant ou obtenir un agrément technique européen (ATE) basé sur un Common Understanding Assesment Procedure (CUAP). Le marquage CE des produits est obligatoire dès lors qu'il existe une norme harmonisée (ou un ATE). Il atteste de la conformité du produit aux dispositions de la directive sur les produits de construction 89/106 CE qui s'applique à tous les produits mis sur le marché, fabriqués ou non dans l'UE.

Le marquage CE des produits isolants est obligatoire depuis le 1^{er} mars 2003. Les produits isolants sont de plus certifiables par l'ACERMI. Les systèmes complets d'isolation peuvent faire l'objet d'avis Technique délivré par la commission chargée de formuler les avis techniques.

Le marquage CE est donc un marquage réglementaire de stricte conformité à la directive des produits de construction ; il est complété par une certification d'aptitude à l'emploi reposant sur les normes d'essais européennes.

Le tableau 16 présente les normes EN applicables aux produits d'isolation.

Tableau 16: normes EN appliquées aux isolants en fonction de leur famille

| Famille | Isolant | Norme EN |
|---|----------------------------------|------------|
| Base minérale | Laines de roche et de verre | EN13162 |
| | Verre cellulaire | EN13167 |
| | Perlite expansée | EN13169 |
| Base organique | Polystyrène expansé (EPS) | EN13163 |
| | Polystyrène extrudé (XPS) | EN13164 |
| | Polyuréthane Polyisocyanurate | EN13165 |
| | Mousse phénolique | EN13166 |
| Base végétale | Liège expansé | EN13170 |
| | Fibres de bois | EN13171 |
| | Laines de bois | EN13168 |
| | Coton | ATE / CUAP |
| | Chanvre | ATE / CUAP |
| | Lin | ATE / CUAP |
| | Cellulose | ATE / CUAP |
| Base animale | Mouton | ATE / CUAP |
| | Plumes de canard | ATE / CUAP |
| Produits minces réfléchissants ATE / CUAP | | |

Le marquage CE requiert, pour la mise sur le marché européen, l'étiquetage de la conductivité thermique et la résistance thermique R ainsi que la classe Euroclasse de réaction au feu du produit. Outre ces caractéristiques, les normes fixent les autres caractéristiques techniques nécessaires à leur application dans les ouvrages qui correspondent aux classes et aux niveaux de performances définis dans la norme EN produit correspondante. Les états membres fixent par réglementation ou dans les règles de l'art, les caractéristiques retenues ainsi que les niveaux de performance.

A noter que pour les isolants à base végétale ou animale, manufacturés ou en vrac, et les isolants minces réfléchissants, le marquage CE est volontaire car l'ATE est basé sur un CUAP ; Ils peuvent faire l'objet de la certification ACERMI et d'un Avis Technique.

Les normes EN13162 à EN 13171 (EUCEB 2008; Norme EN 13162 2001) définissent 9 caractéristiques à déclarer quelle que soit l'application (résistance thermique, conductivité thermique, longueur, largeur, épaisseur, équerrage et planéité, stabilité dimensionnelle à température ambiante, résistance à la traction parallèle aux faces, la réaction au feu

« euroclasse »). Les normes et les CUAP isolants définissent en plus du marquage CE des caractéristiques supplémentaires à déclarer selon l'application.

Pour la France, l'organisme notifié pour le marquage CE est l'ACERMI, si la réaction au feu est au niveau d'attestation de conformité type 1, et les laboratoires notifiés LNE ou le CSTB pour les autres caractéristiques.

Les paramètres à considérer pour le choix des matériaux incluent notamment les propriétés d'isolation thermique, acoustique et de protection au feu. Elles sont complétées par les caractéristiques d'aptitude à l'emploi telles que des spécificités mécaniques, de résistance à l'eau, le fluage, la stabilité dimensionnelle, la traction,....

3.3.1 Les plastiques alvéolaires

3.3.1.1 Le polystyrène expansé (PSE)

Le PSE est obtenu par polymérisation du styrène, issu du naphta (valorisation d'un dérivé de raffinage). Le PSE est fabriqué en trois étapes principales : pré expansion des billes à la vapeur d'eau, maturation ou stabilisation à l'air puis expansion ou moulage en présence de vapeur d'eau. La vapeur d'eau a pour effet de dilater et d'expanser les billes jusqu'à 50 fois leur volume initial. Ceci lui confère des qualités de légèreté et de résistance mécanique élevée. Constitué à 98 % d'air, le matériau s'avère donc léger, facile à travailler et économique.

D'après l'association European Manufacturers of Expanded Polystyrene (EUMEPS) représentant les intérêts des producteurs de PSE, ce matériau représente à l'heure actuelle une part de 30 % du marché de l'isolation pour la construction en Europe. Le PSE a été développé depuis plus de 40 ans et connaît une progression constante dans le secteur de l'isolation. L'EUMEPS indique que la capacité de production européenne s'élève actuellement à 500 000 tonnes.

Selon les applications, les parts de marché pour le PSE varient entre 95 % pour l'isolation des sols à 10 % pour l'isolation des cavités murales. Dans les pays nordiques, les applications d'ingénierie civile représentent 80 % du renouvellement.

Les applications du PSE concernent entre autres l'isolation thermique et acoustique des murs, des toitures ou des sols dans le secteur de la construction résidentielle ou tertiaire.

Le PSE peut se présenter sous forme de panneaux, de blocs ou de produits mis en forme sur mesure. Le produit final peut éventuellement être laminé avec une feuille d'aluminium, un plastique, un feutre de toiture, un panneau de fibres ou d'autres matériaux de revêtement. Le coût du PSE semble inférieur à celui des laines minérales (RPA, 2007). Le FILMM conteste cette information.

Le PSE reste le plastique alvéolaire de choix pour l'isolation. Les plastiques alvéolaires incluant le PSE, le PUR et le XPS présentent une qualité inférieure aux laines minérales en terme de protection incendie en raison de l'émission de fumées nocives lors d'un incendie.

3.3.1.2 Le polystyrène extrudé (XPS)

Le XPS se définit comme une mousse synthétique de structure cellulaire fermée et dont la couleur peut être de teintes diverses. Il est produit par le mélange de polystyrène polymère avec un agent moussant volatil sous pression avant l'extrusion.

Développé dans les années 1940, il a connu une utilisation croissante depuis les années 1950 dans l'isolation thermique. La commercialisation en Europe débute réellement dans les années 1960.

Le XPS est produit par un procédé continu d'extrusion. Des granules de polystyrène sont fondus dans un extruder et un agent d'expansion est injecté à haute pression avant de se dissoudre dans le mélange. Le mélange associant les granules de polystyrène et l'agent d'expansion sont évacués par une boudineuse à filière plate. L'agent d'expansion s'étend en raison de l'augmentation de pression et permet la formation d'un panneau de polystyrène avec une structure cellulaire close et homogène. Les producteurs emploient principalement le CO₂ comme agent d'expansion. Toutefois, pour certaines applications spécifiques nécessitant une faible conductivité thermique, les HFC (HFC-134a, HFC-152a) sont préférés pour l'expansion. Les variations des paramètres du procédé permettent de modifier les caractéristiques du produit selon les exigences de l'application souhaitée (densité s'échelonnant par exemple entre 50 et 70 kg/m³ et une résistance à la compression entre 150 et 700 kPa).

Les applications sont multiples et concernent notamment l'isolation des sols, sous dalles, des toitures inversées (en pente ou terrasse), des chambres froides, des murs et des toitures par l'intérieur et par l'extérieur - également pour des bâtiments agricoles ou des chapes flottantes (EUCEB 2008;Knauf insulation 2008).

Pour le secteur résidentiel, tertiaire ou des établissements recevant du public, les applications incluent également les combles aménagés (Isolation par l'extérieur (Sarking) ou par l'intérieur), les murs (Isolation par l'intérieur ou l'extérieur), les planchers pour des locaux non chauffés (Isolation des planchers maçonnés), les soubassements (Isolation périmétrique), les planchers sur vides sanitaires (Isolation sous chape flottante) ou sur terre plein et les toitures terrasses sur dalle béton (Isolation sous protection lourde ou rapportée) (URSA 2008)

Grâce à sa structure homogène à cellules fermées, le XPS présente une bonne capacité d'isolation thermique, une faible absorption d'eau et une résistance mécanique élevée. Il offre un comportement en compression et un fluage à long terme élevés (Résistance en compression jusqu'à 70 tonnes/m²).

Le XPS se présente sous forme de panneaux sandwich, de composites, de calorifuges... dont la figure 28 illustre une présentation.



Figure 28: illustration d'un panneau de XPS (EXIBA, 2007)

A l'image de toutes les substances organiques, le XPS est combustible. Si les producteurs incluent un retardeur de flamme, le XPS présente un classement en réaction au feu « Euroclasse E » selon la classification européenne.

Les isolants à base de polystyrène commencent à se ramollir et à se contracter à partir de 100 °C. A des températures plus élevées, le XPS fond et des gaz inflammables de décomposition se forment au dessus de 350 °C. Sans source de flammes, des températures de 450 à 500 °C conduisent à l'inflammation des produits de décomposition. Les retardeurs de flamme peuvent augmenter le point d'ignition du matériau et accroître la résistance du plastique (incluant notamment l'hexabromocyclododécane (HBCD – CAS 25637-99-4)).

En 2005, le PSE et le XPS représentaient une utilisation européenne de 800 000 tonnes pour l'isolation et concerneraient une population professionnelle de 430 000 personnes (RPA, 2007).

3.3.1.2 Le polyuréthane (PUR) et Le polyisocyanurate (PIR)

Le PUR et le PIR sont des mousses synthétiques, respectivement commercialisées avec une couleur jaune et une couleur vert clair. Ils présentent une structure cellulaire de type fermé et produites par le mélange de deux résines dont la réaction crée une troisième résine stable.

Le terme d'isolation rigide de polyuréthane regroupe principalement la famille des matériaux d'isolation à base de PUR et de PIR. Le polyuréthane est un terme générique couvrant une large gamme de diverses formulations. Le principal pontage réalisé durant la polymérisation concerne le groupe uréthane mais d'autres liaisons peuvent impliquer les groupements isocyanurate, urée ou d'autres introduits à différents degrés. L'inclusion des groupements de nature différente modifient inévitablement les propriétés de la résine finale. Ainsi, le PIR présente une résistance thermique supérieure, une production de composés volatiles inférieure que le PUR standard.

L'isolant de polyuréthane rigide est produit par le mélange de 4,4-méthylène di-p-phenylene isocyanate, de polyols, d'agents d'expansion définis par un faible point d'ébullition, comme le CO₂ ou le pentane⁸.

Une réaction chimique exothermique est alors initiée entre les composants de base sous forme liquide. La chaleur émise lors de la réaction exothermique volatilise les agents d'expansion et le volume du mélange se multiplie alors par 30. Le syndicat des producteurs BING évoque l'utilisation de fluorohydrocarbures comme le HFC-365 mfc ou le HFC-245 fa pour certaines applications spécifiques, notamment pour des raisons techniques de performance incendie (RPA, 2007).

Les isolants de polyuréthane rigides se présentent sous forme de panneaux, associés ou non avec une face rigide, ou sous forme de blocs. A titre d'exemple, les panneaux d'isolation sont produits à partir d'une calandre à laminer grâce à un procédé continu ou discontinu. Le procédé débute par le mélange par exemple d'isocyanates et de polyols. Le mélange est ensuite étalé sur une surface chauffée à la température souhaitée afin de garantir l'adhésion. La réaction d'expansion se développe et le mélange s'élève le long des parois. Le panneau d'isolation est ensuite coupé à la forme souhaitée et refroidi avant d'être compressé puis stocké.

Les blocs produits par un procédé continu ou discontinu sont ainsi découpés sous forme de panneaux (à titre d'exemple, des panneaux d'isolation pour des toitures plates ou inclinées)

⁸ Le n-pentane représenterait 6 800 tonnes comme agent d'expansion pour le polyuréthane. Ce gaz présenterait un risque sanitaire et environnemental en raison de sa contribution à la formation d'ozone et d'autres substances dangereuses de type smog. Selon la directive 67/548/CE, le pentane est classé comme extrêmement inflammable (F+/R12), nocif (Xn) et les phrases de risque R65, R66 et R67) et dangereux pour l'environnement (N avec les phrases de risque R51/53).

ou de sections (à titre d'exemple, pour l'isolation des coins dans les combles / mansardes ou des conduites) (BING 2008). Les applications potentielles concernent donc l'isolation des bâtiments commerciaux ou industriels et certains procédés industriels (RPA, 2007).

Une étude réalisée par des scientifiques suédois visait à quantifier les isocyanates, les aminoisocyanates et les amines issues de la combustion de 24 types de matériaux ou produits utilisés dans les bâtiments. Les plus grandes concentrations d'isocyanates émises impliquent la laine de verre puis les produits à base de PUR, les panneaux de particules, les caoutchoucs nitriles et les mélamines. Les émissions d'amino-isocyanates ne concernaient généralement que les produits à base de PUR. Selon les auteurs, les isocyanates, comparativement aux autres gaz de combustion, représentent le danger le plus élevé (Hertzberg, Tuovinen, and Blomqvist 2005)

RPA note que, pour les applications d'isolation domestique, le PUR s'avère 4 fois plus cher que les laines minérales. De plus, le PIR présente un coût plus élevé que le PUR.

3.3.1.3 La mousse phénolique

La mousse phénolique se définit comme un matériau isolant inorganique de couleur rouge-brun et de structure micro cellulaire fermée. La mousse est issue d'une réaction entre une base phénol qui réagit avec du formaldéhyde et traitée avec de l'acide sulfurique ou un acide plus faible afin de donner une structure cellulaire fermée.

La mousse phénolique présente des performances thermiques élevées et une gamme variée de produits définis par différentes valeurs de résistance à la compression. Les propriétés de résistance au feu apparaissent largement supérieures à celles des plastiques alvéolaires.

Les applications concernent principalement des usages dans l'industrie, par exemple, pour l'isolation de réservoirs ou de tuyauteries sur des sites pétrochimiques. Les applications concernent également les portes coupe-feu, la protection incendie sur des navires, des installations off shore ou des sous-marins (RPA, 2007).

Selon l'association représentant les producteurs de mousses phénoliques, ces matériaux émettent peu en conditions normales d'utilisation en raison de l'irréversibilité de la réaction phénol-formaldéhyde. Ce constat est divergent des mousses urée-formaldéhyde qui étaient utilisées notamment pour l'isolation des murs et dont la réaction était réversible ; impliquant ainsi des concentrations importantes de formaldéhyde dans l'environnement intérieur des bâtiments (RPA, 2007). Ces mousses urée-formaldéhyde sont interdites depuis les années 1970.

Les industriels suggèrent que cette chimie phénolique présente des coûts équivalents à ceux proposés pour la chimie polyuréthane. Les mousses phénoliques restent plus chers que le polystyrène mais des économies peuvent être faites notamment sur la fixation et la quantité nécessaire d'isolants (RPA, 2007).

Le marché de l'isolation thermique utilise d'autres matériaux isolants plus anecdotiques et présentés ci-dessous.

3.3.2 Le verre cellulaire

Le verre cellulaire est un isolant minéral de couleur noire, composé d'une structure micro cellulaire. Il est produit par un mélange de verre broyé et de carbone, chauffé à plus de 1 000 °C. Le verre cellulaire est un produit inorganique. Selon les professionnels du secteur, l'utilisation du verre cellulaire représente une part marginale en volume du marché français de l'isolation thermique. Ce matériau était principalement utilisé en isolation de toiture-terrasse ainsi que pour l'isolation de bâtiments présentant une forte hygrométrie. Sur ce segment, le verre cellulaire représentait le concurrent le plus direct du XPS au cours de l'étude de MSI. Toutefois, le verre cellulaire présente un coût plus élevé que le XPS. Les performances thermiques de conductivité restent plus limitées que pour les autres matériaux isolants.

Le verre cellulaire connaît une utilisation privilégiée lorsque les contraintes mécaniques sont importantes.

3.3.3 La perlite

La perlite est un matériau isolant rigide à base inorganique de couleur brune. Selon les professionnels du secteur, les produits en perlite ou perlite expansée se trouvent sous la forme de panneaux ou en vrac. En effet, les grains de perlite expansée sont additionnés d'un hydrofugeant et combinés par voie humide avec des fibres et des liants. Après séchage, le panneau rigide obtenu, stable dimensionnellement, présente un bon comportement au feu sans égouttage ni dégagement de gaz toxiques.

3.3.4 La vermiculite

La vermiculite est une roche de type mica utilisée en panneaux pour l'isolation thermique des toitures et en vrac pour l'isolation thermique des planchers. Selon les professionnels du secteur, ce matériau était mélangé à du béton pour la réalisation de chapes isolantes.

Ce minéral a été largement exploité depuis les cinquante dernières années. Actuellement, il est utilisé pour l'isolation et la protection incendie dans les bâtiments et les navires (utilisé en panneaux pour l'isolation thermique des toitures et en granulés pour l'isolation thermique des planchers de grenier) mais aussi comme composant des sols en horticulture ou dans d'autres situations. La fracture des cristaux de vermiculite peut être à l'origine de particules fibreuses de petit diamètre (< 0,1 µm). Néanmoins, ces situations sont très limitées.

Par ailleurs, d'autres matériaux d'isolation peuvent être utilisés. En effet, ces matériaux à base végétale ou animale incluent notamment le chanvre, le liège expansé, les fibres de bois ou de cellulose, les plumes de canard ou la laine de mouton.

3.3.5 Les laines végétales de chanvre ou de lin

Le recours aux laines de chanvre, comme matériau d'isolation, s'est développé au cours de la dernière décennie. En effet, les caractéristiques de ce matériau en termes de résistance thermique apparaissent similaires aux laines minérales de base. Les laines de chanvre utilisées en tant qu'isolant comporte une part de liant de fibres de polyester ainsi que dans de nombreux cas une seconde matière première comme des fibres de coton (recyclé ou non). De ce fait, les performances thermiques varient d'un produit à l'autre et la fibre de chanvre seule n'offre pas de performance thermique élevée. Selon les matières premières, d'autres traitements antifongique, insecticide ou ignifugeant sont nécessaires. Le comportement à la vapeur d'eau et à l'eau de ces isolants nécessitent de respecter des règles de mise en œuvre les protégeant de l'humidité). Les laines de chanvre ont bénéficié d'un intérêt de certains utilisateurs, en grande majorité des particuliers, du fait d'une image environnementale *a priori* favorable car le lin et le chanvre sont des fibres organiques.

L'isolant en chanvre existe sous forme de rouleaux ou en panneaux semi-rigides. Il peut aussi être utilisé en vrac déversé ou soufflé entre les chevrons d'une toiture. La pose de l'isolant chanvre est simple et engendre peu de poussières. Une substance ignifuge doit toutefois lui être ajoutée.

Le lin est une plante qui se cultive facilement. L'isolant en lin est fabriqué à partir de fibres de lin trop courtes pour un usage textile. Il se présente en vrac, sous forme de rouleaux, de plaques semi-rigides ou de feutres. Le lin est un très bon isolant acoustique.

Enfin, à la suite d'une démolition sélective d'un bâtiment, l'isolant en lin peut être composté.

Tous ces matériaux sont encore très peu utilisés actuellement en raison de leur coût élevé et du manque d'information sur leurs caractéristiques techniques (thermique, résistance au feu, à l'eau, ...) et de leurs caractéristiques environnementales (ensemble du cycle de vie) et sanitaires (croissances fongiques...) malgré les référentiels européens et nationaux existants.

Les principaux travaux d'isolation thermique en laine de chanvre étaient destinés aux maisons individuelles. Selon les professionnels du secteur, 85 % des achats de laines de chanvre étaient attribués aux particuliers contre 15 % pour les entreprises de construction en 2004. Les fabricants de laines de chanvre commercialisent leurs produits sous forme de panneaux, de rouleaux ou en vrac. Par ailleurs, les panneaux de laine de chanvre paraissent mieux adaptés pour l'isolation des murs que les rouleaux ou le vrac pour les combles perdus ou aménageables.

3.3.6 Le liège

Le liège, isolant acoustique et thermique naturel provenant de l'écorce de chêne vert, se compose d'une structure cellulaire très légère. Le liège expansé est obtenu par réduction des écorces en grains de grosseurs régulières et agglomérées. Le liège expansé détient un bon pouvoir isolant de conductivité thermique, d'absorption acoustique et de comportement face à l'humidité, à la compression et aux agents chimiques. Selon les professionnels du secteur, le liège expansé était principalement utilisé, sous forme de plaques et de granulés, pour l'isolation de toitures au cours de la période étudiée par MSI (2006). Le problème du liège est sa disponibilité. Il ne peut être produit qu'à petite échelle et il faut attendre une dizaine d'années pour que l'arbre puisse reconstituer une écorce utilisable.

3.3.7 Les produits minces réfléchissants

Les produits minces réfléchissants peuvent avoir plusieurs dénominations telles que films minces réfléchissants, produits d'isolation par thermo réflexion ou encore isolants themoréfléctifs. Les produits minces réfléchissants étaient utilisés, au cours de la période d'analyse 2000 – 2004 du cabinet MSI, uniquement pour l'isolation des toitures et des murs. Selon les professionnels du secteur, les performances techniques n'atteignent pas les performances des isolants dits traditionnels, tels les laines minérales et les plastiques alvéolaires. Toutefois, les produits minces réfléchissants peuvent être considérés comme des compléments d'isolation renforçant la résistance thermique des murs et des toitures. En effet, placés côté intérieur des parois ils réduisent les effets de la condensation sur les parois froides.

Certains produits minces d'isolation bénéficient d'Avis Technique favorable. Depuis peu, des ATE délivrés en tant que complément d'isolation précisent la réelle efficacité des performances techniques annoncées par les fabricants, notamment vis-à-vis des laines minérales et des plastiques alvéolaires.

Les isolants minces sont basés sur la réflexion. En été, ils renvoient vers l'extérieur le rayonnement solaire et en hiver, ils arrêtent le froid et restituent la chaleur émise à l'intérieur des pièces. Les produits minces étant constitués de feuilles en matière plastique se comportent comme des membranes étanches à la vapeur d'eau. La mise en œuvre de ces produits est complexe car elle nécessite une étanchéité parfaite des lames d'air de part et d'autre du produit pour pouvoir bénéficier de la réflexion.

Ces matériaux se composent en général de mousse, d'une feuille de polyéthylène à bulles ou d'un matériau fibreux pris en sandwich entre deux ou plusieurs feuilles d'aluminium ou de film aluminisé. L'ensemble reste très mince – généralement de 0,5 à 3 cm – par rapport aux autres isolants comme le polyuréthane, la laine minérale ou le polystyrène mais n'offre pas la même performance thermique. Dans l'hypothèse d'une construction avec un permis de bâtir ou lors de travaux de rénovation, l'isolation avec uniquement un produit mince réfléchissant seule ne satisfait pas aux exigences réglementaires des différentes régions du pays.

Le groupe spécialisé n°20 du CSTB "produits et procédés spéciaux d'isolation" appartenant à la commission chargée de formuler les avis techniques, a publié, en 2007 (CSTB, Note spéciale, and GROUPE SPECIALISE N° 20 "PRODUITS ET PROCÉDES SPECIAUX D'ISOLATION" 2007), une note d'information sur les performances des produits minces réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe des bâtiments dont les conclusions sont reprises ici.

Leurs performances thermiques intrinsèques étant très faibles (5 à 20 fois inférieures aux performances thermiques exigées pour les bâtiments neufs chauffés), il en résulte plusieurs conséquences :

- la réalisation d'une ou deux lames d'air, étanches à l'air, en contact avec la face peu émissive du produit, permet d'obtenir des résistances thermiques qui s'ajoutent à celle du produit. Toutefois cette performance thermique reste très inférieure aux niveaux réglementaires ;
- la réalisation d'un pare-vapeur efficace côté intérieur des parois, la plupart des films étant très étanches à la vapeur d'eau à condition que les lés soient étanches entre eux ;
- l'amélioration du calfeutrement associé à une augmentation de l'étanchéité à l'air de parois non isolées. Toutefois de mauvaises conditions de mise en œuvre peuvent conduire à des désordres (par exemple, une mauvaise ventilation des charpentes ou des ossatures de bois de maisons) et l'obtention de lames d'air réellement non ventilées (pas de fente de plus de 0,5 mm d'ouverture) est en général très difficile à

obtenir. L'utilisation en écran sous toiture est à proscrire, compte tenu d'une forte étanchéité du produit à la vapeur d'eau.

L'avis du CSTB rappelle que les films dits " réfléchissants " font appel à un principe physique connu depuis longtemps, visant à réduire les échanges thermiques par rayonnement entre deux parois en diminuant l'émissivité de l'une des deux surfaces en vis-à-vis.

Or les performances thermiques, liées aux caractéristiques de surface des films réfléchissants, peuvent se dégrader dans le temps sous l'action de la poussière, des salissures ou de l'humidité. Des condensations peuvent apparaître si le produit est mal positionné dans la paroi, ce qui entraîne une dégradation à terme de toute la structure. De plus, selon les configurations ou les méthodes de mise en œuvre adoptées, le procédé peut entraîner des ponts thermiques non négligeables et ainsi dégrader les caractéristiques thermiques globales de l'ouvrage. Enfin, les risques en cas d'incendie dépendent de la composition des produits (variable d'un isolant à l'autre), de la paroi et de leur positionnement.

La synthèse des résultats de mesures effectuées par plusieurs laboratoires indépendants de Suisse, d'Allemagne, de Grande Bretagne et en France par le CSTB, le CNRS, le laboratoire Armines fait apparaître que, même en ne prenant pas en compte la durabilité, les produits minces réfléchissants ne sont pas équivalents à 200 mm de laine minérale de faible densité, ni même à 100 mm et ceci pour les produits réfléchissants associés à deux lames d'air non ventilées.

Ces produits à eux seuls sont, dans la plupart des cas, insuffisants vis-à-vis de la réglementation thermique dans les logements. La Commission spécialisée du CSTB, a accordé deux premiers avis techniques favorables en tant que compléments d'isolation thermique (application toiture et application mur) à un produit mince réfléchissant.

3.3.8 La wollastonite

Une partie de la wollastonite se trouve à l'état naturel et une partie est élaborée par synthèse. Les gisements de wollastonite les plus importants sont localisés en Finlande, au Mexique, aux Etats-Unis et au Brésil. La Belgique et l'Allemagne produisent de la wollastonite synthétique. En substitution à l'amiante, la wollastonite est surtout utilisée dans la construction pour la fabrication de matériaux d'isolation (fibrociment, plaques d'isolation thermique, revêtements muraux résistants au feu), pour le renforcement des matériaux de construction (ciment, plastique, caoutchouc), dans certains matériaux de friction et d'isolation et dans l'industrie des céramiques et de la métallurgie.

3.3.9 La cellulose

La cellulose, quant à elle, est obtenue à partir de fibres de bois, de pulpe de végétaux ou de récupération du papier. La majeure partie de la cellulose est employée dans la papeterie et l'emballage. La fibre de cellulose est inflammable et hydrophile et doit être mélangée avec des produits minéraux comme le mica ou des vermiculites ou d'autres substances ignifugeantes pour améliorer son comportement en réaction au feu (acide borique/borax, sulfate d'aluminium ou de calcium, carbonate de sodium ou de calcium).

Les fibres de cellulose sont actuellement largement utilisées pour le renforcement du ciment (fibrociment) et du plastique et en projection dans les bâtiments pour l'isolation en soufflage, sous forme de flocages projetés ou étalés.

D'autres matériaux plus marginaux sont évoqués dans la base INIES recensant les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) de produits de construction pour le marché français fournies par les fabricants ou les syndicats professionnels selon la norme NF P01-010. Ces matériaux incluent notamment le béton cellulaire, l'isolation murale ou des toitures à base de plumes de canard.

3.3.10 Autres matériaux

De nombreuses recherches et expérimentations sont menées dans le but de développer des technologies alternatives plus écologiques. Le rapport du RISE (Hertzberg, Tuovinen, and Blomqvist 2005;RISE 2003) mentionne les travaux d'une équipe de chercheurs allemands du Fraunhofer Institut de Dresde qui travaille à la fabrication de céramiques à partir de fibres naturelles. Celles-ci ont une morphologie composite et leur structure leur confère à la fois une grande résistance mécanique, une bonne flexibilité et une faible densité. Les céramiques obtenues à partir de fibres végétales sont parfois désignées par les termes bio céramiques, éco céramiques ou céramiques renouvelables.

L'étude réalisée avant 1994 et référencée par le RISE (2003) relève, par exemple, l'utilisation des coquilles de mollusques de la Mer du Nord pour l'isolation des planchers. Les coquilles de mollusques sont utilisées depuis plusieurs centaines d'années dans la construction aux Pays-Bas. Cependant, ces propositions restent expérimentales et ne répondent en aucun cas aux exigences réglementaires actuelles.

Pour la protection incendie, le plâtre ou d'autres produits (peinture intumescente, plaque de bromate avec silico-calcaire pour le coffrage) peuvent être utilisés comme protection anti-incendie (souvent associés à la laine de roche). Néanmoins, cette alternative risque de poser des problèmes de surcharge et de tenue en épaisseur sur les murs. Il existe trois types de plâtre: celui composé de gypse naturel (que l'on extrait de carrières), celui réalisé à base de phosphates (phosphogypse) et celui produit à base de sulfates provenant de la dépollution des fumées de combustion. Ces deux derniers gypses sont des sous-produits de processus industriels (souvent issus de la production d'engrais phosphatés).

Le tableau 17 propose, par applications, des matériaux d'isolation pouvant être employés.

Le tableau 18 compare ces matériaux d'isolation au regard de certaines caractéristiques physico-chimiques incluant leur conductivité thermique, leur résistance au feu...

Tableau 17: matériaux d'isolation pouvant être employés selon les applications souhaitées

| Applications | | Laines de roche | Laines de verre | Autres matériaux |
|----------------------------|--|-----------------|-----------------|--|
| bâtiments | Murs intérieurs | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, laines végétales |
| | Greniers et combles | ✓ | ✓ | Vermiculite, perlite, cellulose |
| | Toitures inclinée | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS |
| | Toitures terrasses | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, verre cellulaire |
| | Murs extérieurs | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, verre cellulaire |
| | Sols | ✓ | ✓ | PUF, PIR, PSE, XPS, verre cellulaire |
| | Revêtements de tuyaux et de cylindres | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, mousse de polyéthylène, caoutchouc nitrile expansé |
| industries | Equipements et tuyauteries de climatisation | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, mousse phénolique, polyéthylène, caoutchouc nitrile expansé |
| | Production d'équipements domestiques | ✓ | ✓ | PUR, mousse phénolique, laines AES, perlite, vermiculite |
| | Equipements et tuyauteries de climatisation | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, mousse phénolique, caoutchouc nitrile expansé, laines AES, perlite, verre cellulaire, vermiculite |
| | Transport | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, XPS, PVC |
| | Réfrigération, conduites cryogéniques et réservoirs de stockage | ✓ | ✓ | PUR, PIR, PSE, perlite, mousse phénolique, liège |
| Protection incendie | Protection incendie | ✓ | ✓ ? | Vermiculite, ciment, verre cellulaire, laines AES, perlite, gypse, béton imprégné.... |

Tableau 18: comparaison des matériaux d'isolation

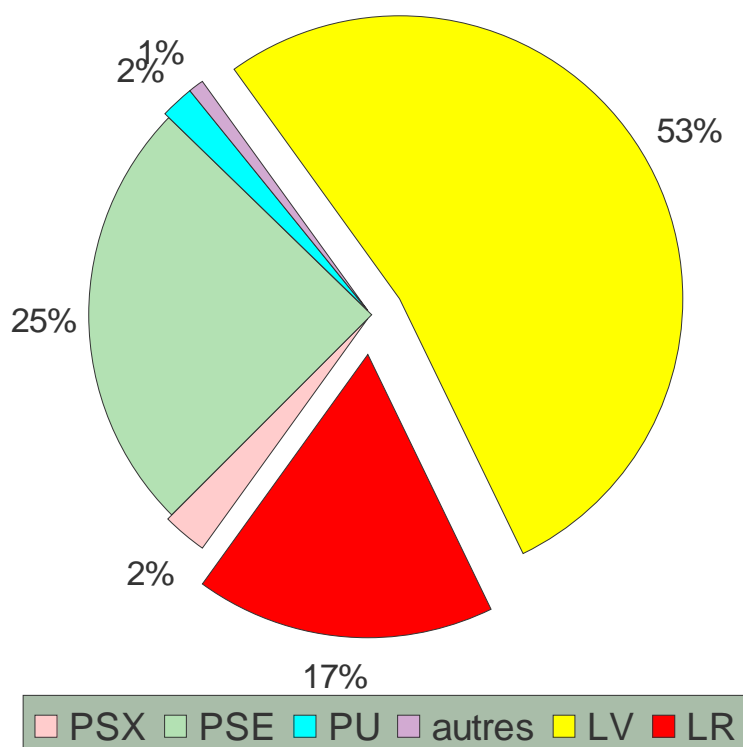
| Paramètres | Laine de verre | Laine de roche | PUR/PIR | PSE | XPS | Mousse phénolique | Vermiculite | Perlite | Verre cellulaire | Béton isolant | Fibres végétales ou animales | Liège | paille |
|-----------------------------|--|----------------|---|--|--|--|--|--|--|---|---|---|-------------------------------|
| Formes | Vrac, flocons, panneaux, rouleaux, sections... | | Panneaux, sections, formes, panneaux sandwich... | Panneaux préformés, granulés.. | Préformés ; sections... | Panneaux préformés, sections, panneaux sandwichs | Vrac, panneaux, formes ... | Vrac, plastiques, composites... | Panneaux, blocs | Bloc couplé avec du PSE, du PSX, du PUR ou du PIR | Vrac et rouleaux | Sous couche, panneaux, rouleaux, revêtements... | Panneaux, ballot |
| Applications | Général industriel (isolation thermique acoustique, protection incendie) et | | Général industriel (isolation thermique) et | Général industriel (isolation thermique acoustique) et | Général industriel (isolation thermique) et | Industriel (isolation thermique) | Industriel (isolation thermique) | Industriel (isolation thermique, substrat, ciment....) | Industriel (isolation thermique, route...) | Général et général (isolation thermique) | Général (isolation thermique et acoustique) | Général (isolation thermique et acoustique) | Général (isolation thermique) |
| Température d'emploi (°C) | 20 à 250 | 20 à 800 | - 180 à 110 / 140 | - 100 à 80 | - 65 à 75 | - 180 à 120 | Plus de 1 100 | - 273 à plus de 1 100 | - 268 à 482 | | | | |
| Conductivité thermique (W : | 0,032 / 0,040 | 0,033 / 0,040 | 0,023 à 0,03 | 0,032 à 0,04 | 0,030 / 0,034 | 0,018 / 0,036 | 0,058 / 0,071 | 0,040 / 0,060 | 0,045 à 0,050 | | | 0,040 à 0,052 | 0,040 à 0,050 |
| Résistance au feu | Euroclasse A1/A2 Non combustible | | Euroclasse D à B Emission de fumées nocives lors d'incendies | Nécessite un retardeur de flammes Emission de fumées nocives lors d'incendies | | Génération limitée de fumées et de gaz toxiques (pas de gouttelettes,) | Résilient au feu | Non combustible et non inflammable | Non combustible | | Nécessite un retardeur de flammes | | Inflammable |
| Aspect sanitaire | Exonération du classement cancérigène de catégorie 3 (directive 97/69/CE) Classées irritantes pour la peau Emission possible de liants | | Produits de combustion pentane | | Danger lié à la combustion et aux produits de combustion | Danger limité lié à la combustion | Contamination éventuelle par l'amiante | Présence éventuelle de silice libre | | | Nature du retardeur de flammes (et de l'insecticide ou rodenticide pour le coton) Pas de classement irritant | Emissions associées de formaldéhyde et de COV | Moisissures éventuelles |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|--|---|---|--|---|---|--|---|--|---|--|-------------------------------------|
| | (formaldéhyde) | | | | | | | | | | | | |
| Coût | 4 à 14 Euros / m ² | 4 à 14 Euros / m ² | Plus cher que les laines minérales (4fois) | Moins cher que les laines minérales ?? | Plus cher que le PSE | Plus cher que les laines minérales | Plus cher que les laines minérales (environ 2 fois) | Variable | Plus cher que les laines minérales | Plus cher que les laines minérales (plus de 2 fois) | Plus cher que les laines minérales (2 à 4 fois) | Plus cher que les laines minérales | Moins cher que les laines minérales |
| Avantages | <p>Non combustible</p> <p>Variété des produits faible conductivité thermique</p> <p>Connaissance du produit par les professionnels</p> <p>Résistance à la moisissure</p> <p>Matières premières recyclées</p> | <p>Faible poids</p> <p>Meilleure isolation thermique</p> <p>Résistance à la moisissure et la croissance de micro-organismes</p> <p>Pas de risque de condensation</p> | <p>Excellentes propriétés mécaniques et de durabilité</p> <p>Résistance à la croissance de micro-organismes et la moisissure</p> <p>Pas d'irritation</p> <p>Faible coût</p> | <p>Répulsion à l'eau</p> <p>Résistance à la moisissure, au mildiou et la corrosion</p> <p>Structure homogène</p> <p>Faible poids</p> <p>Résistance aux solvants</p> <p>Recyclable</p> | <p>Faible conductivité thermique</p> <p>Résistance à la moisissure</p> <p>Force structurelle</p> | <p>Résistance à la moisissure</p> <p>Isolation thermique et acoustique</p> <p>Températures d'usages recyclables</p> | <p>Non combustible</p> <p>Températures d'usages recyclables</p> | <p>Verre recyclé</p> <p>Non combustible</p> <p>Hydrophobe</p> <p>Faible poids</p> <p>Non corrosif</p> <p>Force de compression</p> <p>Stable pour des températures et des conditions d'humidité variables</p> | | <p>Recyclage et compostage possible en fin de vie</p> | <p>Imperméabilité, isolation thermique et acoustique</p> <p>Résistance chimique, à la compression, à l'abrasion, aux moisissures et au mildiou</p> <p>Biodégradable et recyclable naturel</p> | <p>Coût</p> <p>Recyclable</p> <p>Naturelle</p> | |
| Inconvénients | <p>Nature des liants</p> <p>Densité inférieure</p> <p>Humidité</p> <p>Résistance à la compression.....</p> | <p>Réaction au feu</p> <p>Fumées lourdes et toxiques en cas d'incendie</p> <p>Nature des agents d'expansion (Hydrocarbones et HFC)</p> <p>Températures d'usages</p> | <p>Isolations thermique et acoustique inférieures</p> <p>Réaction au feu</p> <p>Nature des retardeurs de flamme (HBCD)</p> <p>Températures d'usages</p> <p>Détérioration aux UV</p> | <p>Réaction au feu</p> <p>Nature des retardeurs de flamme (HBCD)</p> <p>Températures d'usages</p> <p>Détérioration aux UV</p> | <p>Faible potentiel d'isolation acoustique</p> <p>Coût</p> | <p>Faible conductivité thermique</p> <p>Contamination éventuelle d'amiante pour les anciens produits</p> | <p>Coût</p> <p>Caractéristiques thermiques inférieures</p> | <p>Applications limitées</p> | <p>Absorption des moisissures</p> <p>Nature du retardeur de flammes ou du repellent</p> <p>Coût</p> | <p>Emissions éventuelles de formaldéhyde et de COV</p> | <p>présence de moisissures, d'insectes, de vermines</p> <p>Considérations structurelles</p> <p>Poids</p> <p>Nécessité d'un stockage au sec</p> | | |

3.4 Marché de l'isolation

3.4.1 Les chiffres du marché

Le FILMM estime le marché français de l'isolation à 18 000 000 m³ en 2003. La figure 29 présente la répartition du marché français de l'isolation.



PSX : polystyrène extrudé ; PSE : polystyrène expansé ; PU : polyuréthane ; LV : laine minérale de verre ; LR : laine minérale de roche.

Figure 29: la répartition du marché français de l'isolation (FILMM, 2007)

Le marché de l'isolation se répartit principalement entre les laines minérales (60-70 %) et les plastiques alvéolaires (30-40 %) pour l'isolation des bâtiments. Il est difficile d'établir des généralités mais les plastiques alvéolaires semblent principalement destinées pour l'isolation des murs et les laines pour les toits. Parfois, l'architecte propose alternativement des plastiques alvéolaires ou/et des laines impliquant une grande variabilité dans l'utilisation des matériaux d'isolation (FILMM, 2007).

Ces données corroborent celles de l'étude initiée à la demande de l'Agence Qualité Construction et basée sur les informations transmises par la direction des affaires économiques et internationales du ministère de l'équipement entre le premier trimestre 1995 et le quatrième trimestre 1998. Les laines minérales représentaient 65 % du marché des isolants (48 % pour la laine de verre et 17 % pour la laine de roche) et le reste correspondait au PSE, XPS, PUR et autres isolants (Antoine 2002).

Les laines minérales présentent certains avantages au regard des autres matériaux d'isolation, notamment dans le domaine de la protection incendie, leur coût et la facilité de

mise en œuvre. (Ahrens et al. 2006) indiquent le prix en Euro par m² des matériaux respectant un coefficient de transfert thermique égal à $U_p = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$; soit pour les laines minérales entre 5 et 17,5 € par m² ; pour le polystyrène égal à 10 € par m² ; pour le polyuréthane entre 15 et 20 € par m² ; pour le liège égal à 50 € par m² ; pour les panneaux de bois légers égal à 100 € par m² et pour la cellulose entre 12,5 et 20 € par m² en vrac

Le marché français de l'isolation thermique a enregistré une hausse de 9 % entre 2000 et 2004, pour atteindre 21 230 milliers de m³ en 2004 selon les estimations issues de l'étude réalisée par le cabinet MSI sur le marché de l'isolation thermique en France (MSI, 2006). Selon les professionnels du secteur, l'activité de construction neuve et d'entretien-rénovation de bâtiments résidentiels et non résidentiels a été le principal facteur affectant les volumes vendus au cours de la période d'analyse. En 2004, dans le bâtiment, le secteur de la construction neuve comptait pour 53 % du marché de la construction en valeur, alors que 47 % concernait le secteur de l'entretien-rénovation. Par ailleurs, l'évolution de la réglementation thermique des bâtiments, à l'image de la RT 2000 et de la RT 2005, a également influencé positivement le marché français de l'isolation thermique.

L'isolation thermique dans le secteur du bâtiment représentait 91 % du marché total en 2004. La même année, la part du secteur de l'industrie était de 9 %. Par ailleurs, le secteur du bâtiment représentera 92 % du marché total contre 8 % pour l'industrie d'après les estimations de MSI en 2009. De même, le marché français de l'isolation thermique devrait progresser de 12 % entre 2005 et 2009 pour atteindre 24 439 milliers de m³ en 2009. En effet, le marché de l'isolation thermique sera soutenu par le secteur du bâtiment avec une hausse de l'activité de construction neuve, en particulier des bâtiments résidentiels au cours de la même période. L'augmentation du marché français de l'isolation thermique a notamment été influencée par la conjoncture économique, l'activité de construction, la réglementation, notamment la mise en place de la RT 2000 dans le secteur du bâtiment neuf puis la RT 2005, les incitations fiscales pour les travaux d'entretien-rénovation à l'image du taux de TVA à 5,5 % et les crédits d'impôts.

Dans le secteur de l'industrie, les laines minérales et les mousses représentaient 89 % du marché de l'isolation thermique en 2004 ; les 11 % restants étant répartis entre le verre cellulaire, les fibres céramiques et les matériaux microporeux au cours de la même année.

Le diagramme (figure 30) suivant illustre une estimation de l'évolution du marché français de l'isolation thermique, par secteur, entre 2000 et 2009.

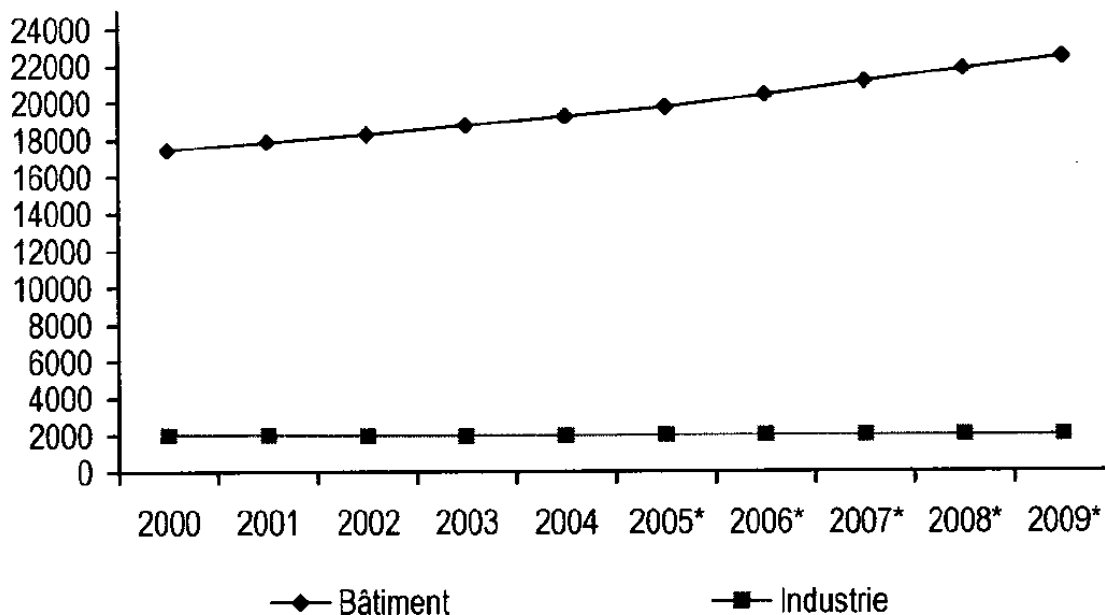


Figure 30: estimation de l'évolution du marché français de l'isolation thermique, par secteur, entre 2000 et 2009 (MSI, 2006)

Dans l'étude réalisée par MSI, le marché de l'isolation thermique inclut les bâtiments résidentiels et non résidentiels dans les secteurs de la construction neuve et de l'entretien-rénovation.

Le marché de l'isolation thermique dans le secteur industriel comprend les travaux de calorifugeage portant sur les appareils, les conduits, les gaines, les tuyauteries de transport de fluides chauds ou froids et les équipements de stockage.

Le marché de l'isolation thermique analysé dans le secteur du bâtiment comprenait les matériaux isolants suivants :

- Les laines minérales, incluant la laine de verre et la laine de roche ;
- Les plastiques alvéolaires comprenant le polystyrène expansé, le polyuréthane, le polystyrène extrudé.

Concernant les panneaux sandwichs, l'étude de MSI ne prenait en compte uniquement les matériaux d'isolation entrant dans la composition du panneau. Dans le cadre de l'étude menée par MSI, la segmentation du marché français de l'isolation thermique dans le bâtiment n'incluait pas les autres types de matériaux isolants tels que le verre cellulaire, la perlite, le liège ou le lin. Selon les professionnels du secteur, les autres matériaux isolants représentaient moins de 200 000 m³ en 2002 dans le secteur du bâtiment. Par ailleurs, le cabinet d'études n'a pas inclus les produits minces réfléchissants.

Le marché de l'isolation thermique analysé dans le secteur du bâtiment prenait en compte les applications suivantes : l'isolation des toitures, l'isolation des murs et l'isolation des sols et des planchers (chape flottante).

Le marché de l'isolation thermique analysé pour le secteur industriel comprenait les matériaux isolants suivants : les laines minérales, les mousses de polyuréthane, les mousses phénoliques et les mousses polyisocyanurate ; le verre cellulaire, les fibres céramiques et les matériaux microporeux. Dans l'étude, les secteurs utilisateurs industriels

incluaient les catégories suivantes : la pétrochimie, la chimie, la pharmacie, l'industrie nucléaire et thermique, l'agro-alimentaire, la construction navale et une catégorie « autres » (notamment les fours de fonderie, les hauts fourneaux, les cuves, les citernes frigorifiques...).

Le marché des laines minérales a enregistré une hausse de 10 % entre 2000 et 2004, pour atteindre un volume de 12,4 millions de m³. Le marché des plastiques alvéolaires a augmenté de 11 % au cours de la même période, pour atteindre un volume de 6,9 millions de m³.

Tableau 19: marché français de l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment, par type de matériau, 2000 – 2004 (MSI, 2006)

| Type de matériau | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Laines minérales | 11 265 | 11 550 | 11 834 | 12 111 | 12 381 |
| - Laine de verre | 8 635 | 8 870 | 9 110 | 9 348 | 9 575 |
| - Laine de roche | 2 630 | 2 680 | 2 724 | 2 763 | 2 806 |
| Plastiques alvéolaires | 6 193 | 6 321 | 6 461 | 6 657 | 6 882 |
| - PSE | 4 955 | 5 065 | 5 184 | 5 355 | 5 552 |
| - PUR | 645 | 654 | 663 | 676 | 687 |
| - PSX | 593 | 602 | 614 | 626 | 643 |
| Total | 17 458 | 17 871 | 18 295 | 18 768 | 19 263 |

Unité : milliers de m³

Comme précédemment indiqué, les laines minérales représentaient 64 % du marché de l'isolation thermique en 2004, contre 36 % pour les plastiques alvéolaires. La part des laines minérales a enregistré une perte de 1 point au cours de la période d'analyse selon les estimations de MSI. En effet, ceci s'explique par une hausse de la demande plus importante des plastiques alvéolaires, en particulier du PSE, au cours de la même période. Par ailleurs, la part des laines de verre était de 50 % du marché total contre 14 % pour les laines de roche en 2004. Concernant les plastiques alvéolaires, le PSE représentait 29 % du total suivi par le PUR avec 4 % et le 3 % pour les XPS au cours de la même année.

Le choix de la laine de verre s'explique notamment par une habitude d'utilisation des installateurs. En effet, la laine de verre est plus souple et épouse plus facilement les irrégularités des toitures ou des murs que les laines de roche ou les plastiques alvéolaires. Par ailleurs, la constitution naturelle des fibres de laines de verre leur confère un avantage sur les fibres de laines de roche, plus friables en particulier sous formes de rouleaux.

Les ventes de laines de roche ont augmenté de 7 % entre 2000 et 2004. Selon les professionnels du secteur, les laines de roche étaient plus utilisées que les laines de verre pour l'isolation des sols et planchers, en raison d'une meilleure résistance à la compression. Toutefois, la laine de roche est souvent plus appréciée pour ses qualités acoustiques que thermiques. Le cabinet MSI constate ainsi un développement moins important des ventes par rapport aux laines de verre au cours de la période étudiée.

Le PSE était le matériau le plus utilisé parmi les plastiques alvéolaires, connaissant la plus forte progression avec une augmentation des ventes de 12 % entre 2000 et 2004. En effet, le PSE représentait 81 % du marché des plastiques alvéolaires en 2004. Selon les professionnels du secteur, le PSE était préféré par les utilisateurs en raison de ses qualités intrinsèques, de sa facilité de pose et de son coût attractif. En outre, les fabricants de PSE

ont proposé de nombreux isolants tels que le PSE db, PSE Th, Ultra Th et le PSE Ultra ThA. Ce dernier est la dernière génération de PSE développé par les fabricants.

Les ventes de PUR et de XPS ont augmenté respectivement de 7 % et de 8 % entre 2000 et 2004. Selon les professionnels du secteur, les PUR et les XPS sont plus isolants à épaisseur égale que les laines minérales ou les PSE. Par ailleurs, ces matériaux sont imperméables ou peu perméables à l'eau et détiennent de bonnes propriétés mécaniques pouvant supporter des charges importantes. En effet, le PUR et le XPS sont principalement destinés à l'isolation des toitures, ainsi que des sols et des planchers au cours de la période étudiée.

Le PUR rigide présente des valeurs d'isolation thermique le plaçant devant la laine de verre, la laine de roche, le PSE et même le XPS.

Le marché des isolants XPS a progressé plus fortement que les isolants PUR en raison d'un seuil de compressibilité supérieur aux PUR ainsi que son caractère imputrescible. Toutefois, les volumes vendus sont restés inférieurs à ceux du PUR au cours de la période d'analyse. En effet, le XPS était le matériau le plus coûteux des produits d'isolation thermique, entre 2000 et 2004, freinant ainsi le choix des utilisateurs. Selon les professionnels du secteur, les XPS sont principalement destinées à l'isolation des toitures terrasses et dans une moindre mesure à l'isolation des sols et planchers.

L'Afsset a commandé en 2008 une étude au cabinet Batim'Etudes sur l'évolution des techniques d'isolation et des matériaux utilisés dans la construction de bâtiments résidentiels et non résidentiels.

Batim'etudes a mis en place en 1992, un observatoire annuel des caractéristiques techniques des bâtiments neufs en France. Cet observatoire s'appuie sur l'interview, chaque année, d'un échantillon représentatif de maîtres d'œuvre ou de maîtres d'ouvrage en charge d'un projet de construction d'un bâtiment neuf dont l'autorisation vient d'être accordée. Les résultats seront disponibles pour :

- d'une part, les bâtiments autorisés en 2001 (construits en 2002) (10 000 enquêtes)
- d'autre part, les bâtiments autorisés en 2006 (construits en 2007) (10 000 enquêtes).

3.4.2 Bâtiment résidentiel

Pour la construction de bâtiments résidentiels, Batim'Etudes propose les statistiques suivantes reflétant l'évolution du nombre de logements construits en 2001 et en 2006. (Batim'Etudes pour l'Afsset 2008)

Tableau 20: nombre de bâtiments résidentiels construits en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | | 2006 (nombre de logements construits) | 2001 (nombre de logements construits) |
|--------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| maisons individuelles isolées | | 181 480 | 157 100 |
| maisons individuelles groupées | Promoteur privé | 35 999 | 18 405 |
| | Promoteur public | 13 246 | 15 295 |
| logements collectifs | Promoteur privé | 141 698 | 78 090 |
| | Promoteur public | 30 147 | 24 310 |

Pour l'année 2006, Batim'Etudes estime la surface hors œuvre pour la construction de maisons individuelles isolées à 25 millions de m², pour les maisons individuelles groupées à 5 millions de m² et pour les logements collectifs à 11 millions de m². Les résultats détaillés par région sont développés en annexe 7.

3.4.2.1 Isolation des toitures

Les laines minérales restent les matériaux les plus utilisés pour l'isolation des toitures. En effet, le caractère souple, la facilité de pose et leurs performances thermiques ont permis à ces isolants de conserver des parts de marché supérieures aux plastiques alvéolaires. Par ailleurs, les entreprises de construction ont gardé des habitudes de construction et restent fidèles à l'utilisation de laines minérales.

Les laines de verre pour l'isolation des toitures restent plus utilisées que les laines de roche. Ces dernières restent considérées par les professionnels du secteur comme plus friables et cassantes que les laines de verre. Toutefois, ces deux types de laines présentent des performances thermiques équivalentes. Les plastiques alvéolaires se développent peu pour l'isolation des toitures. Selon les professionnels du secteur, le choix d'un plastique alvéolaire peut varier suivant le type de toiture et la technique d'isolation employée. Les PSE, PUR et les XPS trouvent une application plus fréquente pour les toitures-terrasses et le sarking (Isolation par l'extérieur). Le XPS permet une isolation inversée des toitures-terrasses en servant l'étanchéité. Placé au dessus de l'étanchéité, le XPS protège ainsi des chocs mécaniques et thermiques, provenant des variations élevées de températures.

L'étude de Batim'Etudes s'est intéressée notamment aux techniques d'isolation des toitures et les matériaux associés dans la construction de logements résidentiels en 2001 et 2006. La part des laines minérales est prédominante, 95% pour les maisons individuelles isolées et 98% pour les maisons individuelles groupées et les logements collectifs, ce qui représente en tout 35 millions de m² de toiture.

La part de la laine de verre (57% en logement collectif, 69% en maisons individuelles isolées et 73% en maisons individuelles groupées) a tendance à diminuer par rapport à 2001, au profit de la laine de roche (25% de part de marché en moyenne).

Les laines agrafées ou déroulées constituent l'essentiel des techniques d'isolation, 70% pour les maisons individuelles isolées, 73% pour les maisons individuelles groupées et 79% pour les logements collectifs. Cependant cette technique diminue, notamment dans les maisons individuelles (-11% pour les maisons individuelles isolées et -14% pour les maisons individuelles groupées par rapport à 2001), au profit des laines soufflées ou en vrac, qui représentent 25% des techniques (maisons individuelles isolées et groupées) et 19% pour les logements collectifs.

Le tableau 21 présente, pour l'année 2001 et 2006, les surfaces de toitures recouvertes par les différentes techniques d'isolation en distinguant le type de bâtiments résidentiels construits.

Tableau 21: techniques d'isolation des toitures pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées (1000 m ²) | | | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | | | Logements collectifs (1000 m ²) | | | |
|--|--|-------------|--------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | |
| Ensemble du marché | 28880 | 100% | 26870 | 100% | 4620 | 100% | 3680 | 100% | 4600 | 100% | 2900 | 100% |
| Laine de verre ou de roche agrafée ou déroulée | 20094 | 70% | 21743 | 81% | 3291 | 71% | 3112 | 85% | 2590 | 56% | 1923 | 66% |
| Laine soufflée en vrac | 7279 | 25% | 3904 | 15% | 1135 | 25% | 469 | 13% | 624 | 14% | 351 | 12% |
| Panneau bois avec isolant incorporé | 296 | 1% | 292 | 1% | 59 | 1% | 42 | 1% | 35 | 1% | 21 | 1% |
| Vermiculite | | | 55 | 0% | 0 | 0% | | | | | | |
| Isolant mince ou film réfléchissant | 692 | 2% | 300 | 1% | 0 | 0% | | | 6 | 0% | | |
| Sarking | | | 154 | 1% | 0 | 0% | | | 21 | 0% | 15 | 1% |
| Complexe de plaque de plâtre + isolant | 519 | 2% | 422 | 2% | 4 | 0% | 13 | 0% | | | | |
| Isolation rapportée sous étanchéité | | | | | 129 | 3% | 45 | 1% | 1297 | 28% | 574 | 20% |

Note du groupe de travail

Les experts du groupe de travail attirent l'attention du lecteur sur l'augmentation de la technique d'isolation des toitures utilisant la laine soufflée en flocons, technique *a priori*, la plus émissive en termes de fibres. Le tableau 22 présente, pour l'année 2001 et 2006, l'évolution de l'emploi de cette technique par région en distinguant le type de bâtiments résidentiels.

Tableau 22: isolation des toitures par de la laine soufflée en vrac pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées (1000 m ²) | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | Logements collectifs (1000 m ²) | |
|------------------|--|-------------|---|------------|---|------------|
| | 2006 | 2001 | 2006 | 2001 | 2006 | 2001 |
| REGIONS | 7279 | 3904 | 1135 | 469 | 624 | 351 |
| Ile de France | 130 | 99 | 73 | 60 | 31 | 20 |
| Champagne | 125 | 12 | 9 | 7 | 3 | |
| Picardie | 100 | 9 | 15 | | 6 | 3 |
| Hte Normandie | 170 | 121 | 3 | | 3 | |
| Centre | 285 | 92 | 43 | 10 | 10 | 3 |
| Basse Normandie | 160 | 65 | 7 | 7 | 5 | |
| Bourgogne | 288 | 159 | 30 | 7 | 15 | 4 |
| Nord-PdC | 160 | 40 | 16 | 5 | 4 | 12 |
| Lorraine | 191 | 23 | 5 | 2 | 11 | 12 |
| Alsace | 91 | 19 | 1 | | 15 | 1 |
| Franche Comté | 196 | | 1 | | 3 | 3 |
| Pays de Loire | 1119 | 512 | 51 | 12 | 35 | 19 |
| Bretagne | 314 | 45 | 34 | | | 4 |
| Poitou-Charentes | 705 | 332 | 131 | 30 | 28 | 11 |
| Aquitaine | 674 | 507 | 238 | 116 | 110 | 74 |
| Midi-Pyrénées | 680 | 410 | 165 | 109 | 111 | 63 |
| Limousin | 185 | 132 | 18 | 14 | 28 | 11 |
| Rhône-Alpes | 604 | 476 | 146 | 26 | 85 | 43 |
| Auvergne | 370 | 266 | 26 | 6 | 16 | 6 |
| Languedoc-R. | 429 | 395 | 59 | 26 | 31 | 10 |
| Provence C. Azur | 303 | 190 | 63 | 33 | 74 | 50 |

Le tableau 23 présente, pour les années 2001 et 2006, les surfaces de toitures recouvertes par les différents matériaux d'isolation en distinguant le type de bâtiments résidentiels construits.

Tableau 23: produits d'isolation des toitures pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées | | | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | | | Logements collectifs (1000 m ²) | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | |
| Ensemble du marché | 28880 | 100% | 26870 | 100% | 4620 | 100% | 3680 | 100% | 4600 | 100% | 2940 | 100% |
| Laine de verre | 19881 | 69% | 20483 | 76% | 3382 | 73% | 3119 | 85% | 2609 | 57% | 2080 | 71% |
| Laine de roche | 7537 | 26% | 5640 | 21% | 1092 | 24% | 473 | 13% | 1156 | 25% | 385 | 13% |
| PSE | 413 | 1% | 354 | 1% | 6 | 0% | 5 | 0% | 25 | 1% | 15 | 1% |
| XPS | 68 | 0% | 45 | 0% | 6 | 0% | 13 | 0% | 129 | 3% | 69 | 2% |
| Polyuréthane | 164 | 1% | 348 | 1% | 106 | 2% | 70 | 2% | 654 | 14% | 380 | 13% |
| Béton cellulaire | | | | | | | | | | | 10 | 0% |
| Produit mince réfléchissant | 693 | 2% | | | 28 | 1% | | | 27 | 1% | | |
| Laine de chanvre | 125 | 0% | | | | | | | | | | |

3.4.2.2 Isolation des murs

Selon les professionnels du secteur, plusieurs solutions techniques sont envisageables incluant notamment les plaques d'isolations simples, les complexes isolants et les panneaux sandwichs. Les complexes isolants ou panneaux composites sont constitués d'un parement de plâtre évitant une cloison de doublage, et par conséquent occupant une surface moins importante que les contre-cloisons. Ces complexes de doublage sont principalement composés de PSE, de XPS, de PUR ainsi que des laines minérales.

L'isolation des murs par l'extérieur est plus onéreuse en raison d'une mise en place plus compliquée notamment pour la réalisation des modénatures, balcons, linteaux et tour des baies demandant plus de main d'œuvre spécialisée et l'installation d'échafaudages. Selon les professionnels du secteur, l'isolation des murs par l'extérieur regroupent plusieurs solutions techniques, notamment les isolants sous enduits minces et hydrauliques, les isolants sous bardages rapportés ou des ossatures recouvertes de parement extérieur et les enduits épais constitués de mortiers renforcés de particules de produits isolants. Les systèmes d'isolation sous enduits minces se composent principalement de PSE complétés par un enduit armé d'un tissu de fibres de verre et d'un enduit de finition. Le PSE est soit collé à la paroi, soit fixé de manière mécanique.

Les ventes de plastiques alvéolaires progressent plus fortement que celles des laines minérales pour cette application selon les estimations de MSI. Selon les professionnels du secteur, les plastiques alvéolaires restent plus utilisés notamment en raison d'une incompatibilité chimique des laines minérales avec le ciment. Les plastiques alvéolaires restent plus faciles à poser, de meilleure performance thermique et mécanique et d'une

durabilité légèrement supérieure aux laines minérales. Toutefois, les laines minérales restent bien implantées dans le secteur résidentiel, en particulier dans les logements individuels en raison d'une habitude d'utilisation par les particuliers et les entreprises de construction. L'application de la laine de verre prédomine et, selon les professionnels, les laines de roche sont considérées comme plus fragiles.

La part des PSE dans les plastiques alvéolaires reste majoritaire pour cette application en 2004. Selon les professionnels du secteur, le poids dominant du PSE s'explique par un coût peu élevé par rapport aux autres types de plastiques alvéolaires et dispose d'un bon confort thermique. Les PSE se présentent sous forme de plaques ou de complexes isolants ainsi que des panneaux sandwichs. Ces derniers sont principalement destinés au secteur résidentiel. Les PUR et les XPS disposent de bonnes performances thermiques, supérieures aux PSE et aux laines minérales. Selon les professionnels du secteur, les PUR et les XPS, d'utilisation marginale, sont plutôt destinés au secteur résidentiel principalement en raison d'un coût plus élevé que les autres types de produits.

L'étude de Batim'Etudes s'est intéressée notamment aux techniques d'isolation des murs et les matériaux associés dans la construction de logements résidentiels en 2001 et 2006. La quasi-totalité de l'isolation des murs dans les logements se fait par l'intérieur, 93% pour les maisons individuelles isolées, 98% pour les maisons individuelles groupées et les logements collectifs.

Concernant le matériau d'isolation des murs, le polystyrène domine largement dans les logements collectifs et les maisons individuelles groupées, avec respectivement 91% et 81% de part de marché. Cette similitude dans l'emploi du polystyrène, s'explique par le fait que ce sont essentiellement les promoteurs privés qui sont les maîtres d'œuvre de ces logements (73% pour les maisons individuelles groupées, 82% pour les logements collectifs).

La part des laines minérales dans les logements collectifs est stable, avec 8%, soit près de 0.6 millions de m² de surfaces de murs, se répartissant à l'identique 4% laine de verre et 4% laine de roche.

Cependant, la part des laines minérales dans les maisons individuelles groupées, a plus que doublé en 5 ans, passant de 7 à 16%, soit près de 0.7 millions de m² de surfaces de murs, se répartissant entre 10% laine de verre et 6% laine de roche.

Quant aux maisons individuelles isolées, les laines minérales représentent 59% des matériaux isolants de murs, soit 15 millions de m² de surface de murs, se répartissant entre laine de verre 43% (+2% par rapport à 2001) et laine de roche 16%.

Le tableau 24 présente, pour l'année 2001 et 2006, les surfaces de murs recouvertes par les différentes techniques d'isolation en distinguant le type de bâtiments résidentiels construits.

Tableau 24: techniques d'isolation des murs pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées (1000 m ²) | | | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | | | Logements collectifs (1000 m ²) | | | |
|---------------------------|--|-------------|--------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | |
| Ensemble du marché | 25300 | 100% | 18680 | 100% | 4210 | 100% | 2910 | 100% | 7350 | 100% | 5370 | 100% |
| Par l'extérieur | 220 | 1% | 146 | 1% | 28 | 1% | 41 | 1% | 211 | 3% | 128 | 2% |
| Par l'intérieur | 23507 | 93% | 17964 | 96% | 4129 | 98% | 2829 | 97% | 7104 | 97% | 5219 | 97% |
| Isolation centrale | 1573 | 6% | 570 | 3% | 53 | 1% | 40 | 1% | 35 | 0% | 22 | 0% |

Le tableau 25 présente, pour l'année 2001 et 2006, les surfaces de murs recouvertes par les différents matériaux d'isolation en distinguant le type de bâtiments résidentiels construits.

Tableau 25: produits d'isolation des murs pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées (1000 m ²) | | | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | | | Logements collectifs (1000 m ²) | | | |
|---------------------------|--|-------------|--------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | |
| Ensemble du marché | 25300 | 100% | 18680 | 100% | 4210 | 100% | 2910 | 100% | 7350 | 100% | 5370 | 100% |
| PSE | 7777 | 31% | 6594 | 35% | 3321 | 79% | 2656 | 91% | 6452 | 88% | 4777 | 89% |
| XPS | 300 | 1% | 184 | 1% | 60 | 1% | 22 | 1% | 194 | 3% | 134 | 2% |
| Polyuréthane | 350 | 1% | 396 | 2% | 53 | 1% | 14 | 0% | 80 | 1% | 26 | 0% |
| Laine de verre | 10966 | 43% | 7648 | 41% | 437 | 10% | 141 | 5% | 303 | 4% | 284 | 5% |
| Laine de roche | 3993 | 16% | 2974 | 16% | 259 | 6% | 61 | 2% | 286 | 4% | 133 | 2% |
| Béton cellulaire | 86 | 0% | 141 | 1% | 18 | 0% | 3 | 0% | 13 | 0% | 2 | 0% |
| Brique isolante | 1487 | 6% | 559 | 3% | 35 | 1% | 12 | 0% | 22 | 0% | 13 | 0% |
| Autres | 340 | 1% | 184 | 1% | 26 | 1% | | | | | 1 | 0% |

3.4.2.3 Isolation des sols et des planchers

Les ventes de plastiques alvéolaires pour cette application restent majoritaires. En effet, les plastiques alvéolaires ont un seuil de compressibilité plus élevé pouvant supporter une charge supérieure. Par ailleurs, la faible épaisseur des plastiques alvéolaires permet un gain de place de hauteur sous plafond. Concernant les plastiques alvéolaires, les PSE restent le matériau le plus employé devant les XPS et les PUR. Les XPS étaient considérés comme les plus performants mais restent coûteux.

Selon les professionnels du secteur, les plastiques alvéolaires sont mieux adaptés à l'installation de planchers chauffants de type hydraulique ou électrique en l'absence de contrainte acoustique et pour les planchers bas des bâtiments. L'application de plastiques alvéolaires est destinée à tous types de sols et de planchers dans les logements, les bâtiments tertiaires ou encore les sols industriels.

Les laines minérales représentaient 46 % du marché de l'isolation thermique des sols et des planchers en 2004. Les laines de roche étaient majoritaires en raison d'une meilleure résistance à la compression.

L'étude de Batim'Etudes s'est intéressée notamment aux techniques d'isolation des premiers planchers et les matériaux associés dans la construction de logements résidentiels en 2001 et 2006. Pour les matériaux d'isolation des premiers planchers des logements collectifs, la part de marché globale de la laine de roche est majoritaire avec 58%, ce qui représente une surface de près de 2 millions de m², malgré une baisse de 12% par rapport à 2001. Cette baisse est due essentiellement à la baisse de la technique de projection de laine de roche qui passe de 66% en 2001, à 50% en 2006, quant à la part de marché des panneaux de laine de roche, que ce soit en fond de coffrage ou en sous face, elle a doublé en 5 ans, passant de 4 à 8%.

Le tableau 26 présente, pour l'année 2001 et 2006, les surfaces de premiers planchers recouvertes par les différentes techniques d'isolation en distinguant le type de bâtiments résidentiels construits.

Tableau 26: techniques d'isolation des premiers planchers pour la construction de bâtiments résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Maisons individuelles isolées (1000 m ²) | | | | Maisons individuelles groupées (1000 m ²) | | | | Logements collectifs (1000 m ²) | | | |
|---|--|-------------|--------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | | 2006 | | 2001 | |
| Ensemble du marché | 22700 | 100% | 18650 | 100% | 3620 | 100% | 2640 | 100% | 3435 | 100% | 2040 | 100% |
| Terre plein sans chauffage par le sol | 4916 | 22% | 4537 | 24% | 2638 | 100% | 1894 | 100% | | | | |
| Terre plein avec chauffage par le sol | 5331 | 23% | 3656 | 20% | 263 | 7% | 256 | 7% | | | | |
| Poutrelles + hourdis béton | 5495 | 24% | 4343 | 23% | | | | | | | | |
| Poutrelles + hourdis isolant ⁹ | 6958 | 31% | 6114 | 33% | | | | | 105 | 3% | 25 | 1% |
| Prédalle + dalle BA | | | | | 28 | 1% | 39 | 1% | | | | |
| Poutrelles + hourdis isolant ¹⁰ + dalle | | | | | 556 | 15% | 413 | 16% | | | | |
| Poutrelles + hourdis non isolant + chappe flottante | | | | | 74 | 2% | 33 | 1% | | | | |
| Autres | | | | | 17 | 0% | 3 | 0% | | | | |
| Bois | | | | | 43 | 1% | | | | | | |
| Fibrastyrène ¹¹ en fond de coffrage | | | | | | | | | 187 | 5% | 153 | 8% |
| Fibrastyrène rapporté en sous face | | | | | | | | | 698 | 20% | 237 | 12% |
| Fibraroc ¹² en fond de coffrage | | | | | | | | | 3 | 0% | | |
| Fibraroc rapporté en sous face | | | | | | | | | 69 | 2% | 18 | 1% |

⁹ PSE généralement d'après Batim'Etudes

¹⁰ PSE généralement d'après Batim'Etudes

¹¹ Polystyrène associé à un panneau composite en bois

¹² Laine de roche associée à un panneau composite en bois

| | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|------|-----|------|-----|
| Panneau de laine de roche en fond de coffrage | | | | | | | | | 25 | 1% | 29 | 1% |
| Panneau de laine de roche rapporté en sous face | | | | | | | | | 159 | 5% | 33 | 2% |
| Prédalle pré-isolée | | | | | | | | | 3 | 0% | | |
| Projection de laine de roche | | | | | | | | | 1732 | 50% | 1351 | 66% |
| Isolation par-dessus la dalle sous chape flottante | | | | | | | | | 453 | 13% | 194 | 10% |

3.4.3 Bâtiment non résidentiel

Pour la construction de bâtiments non résidentiels, Batim'Etudes propose les statistiques suivantes reflétant l'évolution du nombre de bâtiments non résidentiels construits en 2001 et en 2006.

Tableau 27: surfaces construites pour les bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | Surface hors œuvre nette construite (1000 m ²) | |
|---------------------|--|--------|
| | 2006 | 2001 |
| Bureaux | 4 130 | 4 300 |
| Industrie | 7 820 | 10 000 |
| Stockage | 2 795 | 9 450 |
| Commerce | 4 530 | 4 080 |
| Enseignement | 4 450 | 3 920 |
| Sport et culture | 2 250 | 2 050 |
| Hôtels hébergement | 520 | |
| Santé ¹³ | 2 930 | 1 640 |

3.4.3.1 Isolation de la toiture

D'après l'étude de Batim'Etudes, les laines minérales dans l'ensemble des bâtiments non résidentiels (Bureaux, commerces, industrie, stockage, enseignement, hôtels) représentent près de 15 millions de m² de toiture. La part des laines minérales est majoritaire, allant de 67% dans les bureaux à 80% dans les hôtels, mais est en baisse légère, -2% en moyenne, sauf dans les bâtiments de sport et de stockage où elles progressent.

Contrairement aux logements, de manière générale, la part de la laine de roche est majoritaire, dans l'isolation de la toiture, sauf pour les hôtels, de 39% dans l'enseignement à 63% dans le stockage, mais a tendance à diminuer au profit de la laine de verre, dont la part de marché va de 12% en stockage à 39% dans l'enseignement.

La technique de la laine soufflée est quasi inexistante dans les bâtiments non résidentiels.

Les résultats pour les techniques d'isolation de la toiture pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 sont disponibles à l'annexe 7

Le tableau 28 présente les statistiques des laines minérales pour l'isolation des toitures dans la construction de bâtiments non résidentiels (en termes de surface et de pourcentage d'usage de la laine minérale par rapport aux autres produits d'isolation).

¹³ Hopitaux, cliniques, maisons de retraite, crèches...

Tableau 28: part des laines minérales utilisées par l'isolation des toitures pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | 2006 (surface en 1000 m ²) | | | | 2001 (surface en 1000 m ²) | | | |
|--------------------|--|-----|----------------|-----|--|-----|----------------|-----|
| | Laine de verre | | Laine de roche | | Laine de verre | | Laine de roche | |
| Bureaux | 217 | 14% | 835 | 53% | 325 | 14% | 888 | 54% |
| Industrie | 961 | 13% | 4375 | 59% | 1440 | 15% | 5884 | 62% |
| Stockage | 321 | 12% | 1711 | 63% | 195 | 7% | 1862 | 66% |
| Commerce | 755 | 17% | 2729 | 61% | 517 | 13% | 2784 | 71% |
| Enseignement | 468 | 39% | 458 | 38% | 461 | 43% | 375 | 35% |
| Sport et culture | 492 | 26% | 852 | 45% | 579 | 32% | 681 | 37% |
| Hotels hébergement | 114 | 48% | 76 | 32% | | | | |
| Santé | 485 | 31% | 648 | 42% | 389 | 45% | 255 | 30% |

3.4.3.2 Isolation des murs

D'après l'étude de Batim'Etudes, les laines minérales dans l'isolation des murs de bâtiments non résidentiels représentent près de 8,4 millions de m² de façade.

Pour l'isolation des murs, les bâtiments non-résidentiels peuvent être divisés en 2 groupes. Un groupe composé des commerces, des bâtiments d'industrie et de stockage, dont la majorité de l'isolation se fait de manière centrale entre 62% pour les commerces et 69% pour l'industrie et un autre groupe composé des bureaux, des bâtiments d'enseignement, de sport, de santé, dont la majorité de l'isolation se fait par l'intérieur, de 48% pour les bâtiments de sport à 84% pour les hôtels.

Pour le 1er groupe à isolation centrale, la part des laines minérales est nettement majoritaire entre 59 et 63% de parts de marché, mais a tendance à baisser -7% par rapport à 2001 pour les bâtiments d'industrie et -6% pour le stockage.

La part de la laine de verre, comprise entre 45% pour le stockage et 51% pour l'industrie, diminue au profit de la laine de roche, dont la part est passée de 5 à 14% pour les bâtiments de stockage, et 6 à 16% pour les commerces entre 2001 et 2006.

Pour le 2^{ème} groupe des bâtiments non résidentiels à isolation intérieure, la part des laines minérales est en-dessous des 50%, allant de 32% pour les bâtiments de santé à 49% pour les bâtiments de sport. Cependant, la part des laines minérales progressent nettement, en moyenne de 7%, allant jusqu'à +13% pour les bâtiments d'enseignement, grâce notamment à l'augmentation de la laine de roche.

Dans la répartition des laines minérales pour les bâtiments à isolation des murs par l'intérieur, la part de la laine de verre reste supérieure, avec une part de marché comprise entre 17% pour les bâtiments de santé et 35% pour les bureaux, avec une progression par rapport à 2001, un peu plus faible que la laine de roche, dont la part de marché est comprise entre 12% pour les bureaux et 22% dans les bâtiments de sport.

Le tableau 29 présente, pour l'année 2001 et 2006, les surfaces de murs recouvertes par les différentes techniques d'isolation en distinguant le type de bâtiments non résidentiels construits.

Tableau 29: techniques d'isolation des murs pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | 2006 (surface en 1000 m ²) | | | | 2001 (surface en 1000 m ²) | | | |
|--------------------|--|-----------------|-----------------|--------------------|--|-----------------|-----------------|--------------------|
| | Pas d'isolation | Par l'extérieur | Par l'intérieur | Isolation centrale | Pas d'isolation | Par l'extérieur | Par l'intérieur | Isolation centrale |
| Bureaux | 256 | 280 | 1039 | 511 | 294 | 148 | 867 | 561 |
| Industrie | 1010 | 54 | 359 | 3147 | 797 | 78 | 374 | 4321 |
| Stockage | 469 | 42 | 124 | 1004 | 374 | 14 | 33 | 1019 |
| Commerce | 455 | 44 | 530 | 1681 | 254 | 24 | 691 | 1382 |
| Enseignement | 71 | 120 | 726 | 128 | 76 | 39 | 799 | 56 |
| Sport et culture | 295 | 173 | 803 | 414 | 254 | 76 | 735 | 369 |
| Hotels hébergement | 10 | 19 | 269 | 22 | | | | |
| Santé | 86 | 138 | 1105 | 107 | 60 | 38 | 644 | 67 |

Le tableau 30 présente les statistiques des laines minérales pour l'isolation des murs dans la construction de bâtiments non résidentiels (en termes de surface et de pourcentage d'usage de la laine minérale par rapport aux autres produits d'isolation).

Tableau 30: part des laines minérales utilisées par l'isolation des toitures pour la construction de bâtiments non résidentiels en 2001 et 2006 (Batim'Etudes, 2008)

| | 2006 (surface en 1000 m ²) | | | | 2001 (surface en 1000 m ²) | | | |
|--------------------|--|------|----------------|-----|--|-----|----------------|-----|
| | Laine de verre | | Laine de roche | | Laine de verre | | Laine de roche | |
| Bureaux | 725 | 35 % | 256 | 12% | 551 | 29% | 188 | 10% |
| Industrie | 2336 | 51% | 556 | 12% | 3346 | 60% | 546 | 10% |
| Stockage | 738 | 45% | 229 | 14% | 863 | 60% | 76 | 5% |
| Commerce | 1273 | 47% | 426 | 16% | 1287 | 55% | 131 | 6% |
| Enseignement | 241 | 23% | 218 | 21% | 184 | 19% | 117 | 12% |
| Sport et culture | 450 | 27% | 364 | 22% | 524 | 37% | 118 | 8% |
| Hotels hébergement | 62 | 19% | 45 | 14% | | | | |
| Santé | 249 | 17% | 209 | 15% | 113 | 14% | 77 | 9% |

3.4.3.3 Isolation industrielle

La laine de roche reste plus employée sur des appareils tels que les chaudières ou les cheminées en raison de températures d'emploi plus élevées et une performance en résistance au feu accrue (par exemple les conduits de fumée et les cheminées). La laine de verre paraît privilégiée pour l'isolation des tuyauteries.

Selon les professionnels du secteur, la laine de roche a pour effet de provoquer des irritations cutanées plus importantes que la laine de verre lors de sa manipulation. Lors de l'isolation d'une chaudière avec de la laine minérale, cette dernière est fréquemment recouverte par une enveloppe métallique de type grillage, cerclage ou chemisage afin

d'améliorer la fixation du support. Les industriels sont habitués à intégrer dans leurs projets de calorifugeage les laines minérales en raison d'une qualité reconnue de ces matériaux, de son coût peu élevé et de sa tenue dans le temps.

Les autres types d'isolants paraissent plus anecdotiques. Parmi les plastiques alvéolaires, le polyisocyanurate semble le matériau le plus performant et présente une meilleure résistance au feu que le PUR et les mousses phénoliques. Le polyisocyanurate est principalement utilisé pour des processus industriels à froid. Selon les professionnels du secteur, les mousses phénoliques sont freinées par des problèmes de corrosion, d'une forte abrasivité, d'une mise en œuvre très désagréable pour les poseurs en raison de sa composition très poussiéreuse. Par ailleurs, les mousses phénoliques sont considérées comme un produit onéreux et regroupant peu d'avantages intrinsèques. Toutefois, les mousses étaient utilisées par les industriels en particulier par les industries pharmaceutiques en raison de leur classement M1 au feu.

L'utilisation du verre cellulaire, en diminution au cours des dernières années, se destine généralement à l'isolation frigorifique. A titre d'exemple, les tuyauteries d'eau glacée, les installations cryogéniques, atteignant des températures de -180 °C à -200 °C , représentent les principales applications d'isolation thermique pour ce matériau. Le verre cellulaire reste très coûteux, fragile et abrasif nécessitant une manipulation attentionnée.

Les ventes de matériaux microporeux, en diminution au cours des dernières années pour ces applications, correspondent à des exigences spécifiques des secteurs utilisateurs. En effet, l'isolation thermique en matériaux microporeux est destinée à des installations employant de hautes températures (installations pétrochimiques, des aciéries, des fonderies ou encore des centrales thermiques et nucléaires) avec des applications difficilement accessibles.

A titre indicatif, l'annexe 8 synthétise pour l'année 2004 les estimations du cabinet MSI quant à la répartition de l'isolation thermique en France selon le type de secteur, d'isolation et de matériau isolant. Cependant, il est à noter que ces statistiques ne sont pas comparables à celles de Batim'Etudes puisqu'elles concernent à la fois l'entretien/rénovation et la construction (uniquement la construction pour Batim'Etudes) et les résultats sont présentés en volume (en surface pour Batim'Etudes).

Des données plus précises concernant l'évolution du marché de l'isolation thermique dans le secteur du bâtiment et de l'industrie entre 2000 et 2004 et des prévisions pour les années 2005 à 2005 sont disponibles dans le rapport du cabinet MSI intitulé « l'isolation thermique en France » (MSI, 2006).

.

3.5 Maintenance

La maintenance concerne principalement les installations thermiques ou de transport des fluides. Les professionnels sont impliqués dans le renouvellement des laines minérales pour le calorifugeage en milieu industriel ou résidentiel (chaudière, canalisations, conduites, climatisation, turbine, installation électrique...) et, à plus longue échéance, pour le bâtiment, le renouvellement de l'isolation tertiaire ou résidentielle (Cf. tableau 31).

Les installations thermiques des bâtiments neufs aussi bien que ceux en rénovation sont concernés. Les professionnels peuvent également, lors de dépannage de divers éléments défectueux, être en contact avec les laines minérales.

Le calorifugeage concerne uniquement les professionnels avec une fréquence variable qui semble annuelle.

Pour l'isolation des applications en bâtiment des secteurs tertiaire ou résidentiel, le renouvellement des laines minérales est réalisé environ tous les 30 ans ou 50 ans majoritairement par des professionnels et parfois par des particuliers.

3.6 Accessibilité et moyens de repérage de ces fibres

3.6.1 Accessibilité

Le FILMM indique que les laines minérales de verre ou de roche, dans des conditions normales d'utilisation pour l'isolation des bâtiments tertiaires ou résidentiels, ne présentent aucun contact direct avec l'ambiance des locaux. Elles sont intégrées :

- Au gros œuvre dans le cas des planchers ;
- Au dessus du gros œuvre en terrasse sous l'étanchéité ;
- En sous face de gros œuvre dans les locaux techniques ;
- Entre le gros œuvre et les parements intérieurs (brique, plâtre, bois, métal) pour les murs,
- Au milieu des éléments de cloison ;
- Dans les combles perdus au dessus des locaux habitables ;
- Dans et entre les éléments de charpente dans les combles aménagés et toujours derrière des parements.

Elles sont surfacées de revêtements étanches et/ou décoratifs dans le cas des plafonds suspendus décoratifs ou insérées dans les plénums des plafonds.

Cependant, d'autres applications nuancent ce constat et peuvent être l'occasion d'exposition aux laines minérales, notamment leur usage (principalement de la laine de roche ou de laitier) pour la projection dans les bâtiments résidentiels ou non (garages souterrains par exemple), les interventions des particuliers sur l'isolation de leurs combles ou de leurs toitures, la culture hors-sol, l'isolation de conduites ou de canalisations en milieu industriel....

Pour la réalisation de revêtements par projection pneumatique de laines minérales avec liant, les conditions de mise en œuvre sont explicitement définies par la norme AFNOR NF P 15-202-1 (incluant notamment des tests d'adhérence et de cohésion).

D'après le FILMM, l'exposition concerne principalement les producteurs et les professionnels assurant l'isolation primaire et le renouvellement de l'isolation. Cependant d'autres catégories socio-professionnelles sont concernées et accèdent aux laines minérales

(maintenance d'équipements, ...). Les catégories sont recensées dans le chapitre relatif à l'évaluation de l'exposition.

L'expertise collective Inserm (1999) liste des opérations pouvant occasionner une exposition aux laines minérales et reprises dans le tableau 31.

Tableau 31: opérations pouvant occasionner une exposition aux laines minérales (Inserm, 1999)

| <i>Production de laines minérales</i> | <i>Opérations associées</i> |
|--|--|
| <i>Intervention sur projection (flocage)</i> | <i>Projection, enlèvement, travail au voisinage de projection (flocage)</i> |
| <i>Intervention sur rouleaux, matelas, coquilles et panneaux</i> | <i>Pose, dépose, découpe à la main, découpe avec un outil mécanique, perçage</i> |
| <i>Intervention sur calorifuge industriel</i> | <i>Fours industriels, tuyauterie, étuves et autoclaves, chaudières, turbines, industrie du nucléaire, installation de distillation, isolation d'appareils électriques, matériel frigorifique</i> |
| <i>Manipulation de laines minérales en vrac</i> | <i>Soufflage, pose</i> |
| <i>Utilisation de laines minérales en horticulture</i> | |
| <i>Travaux de nettoyage</i> | <i>Balayage, nettoyage à l'aspirateur</i> |
| <i>Démolition</i> | |
| <i>Manutention, transport, distribution et stockage</i> | |
| <i>Travail au voisinage d'un poste polluant</i> | |

H Antoine (2002) note que les fibres peuvent être libérées notamment par des systèmes de ventilation dont les conduits sont recouverts de laines minérales, ou à partir de la dégradation des faux plafonds fibreux et des matériaux isolants.

Le syndicat national de l'isolation, auditionné dans le cadre de cette saisine, souligne que, de manière générale, l'accessibilité reste réduite pour la population générale dans le 1^{er} et le 2^e œuvre et concerne principalement la maintenance. En thermique industrielle, l'isolant est souvent revêtu. L'isolant peut se trouver dans l'appareil et l'accessibilité concerne l'ouvrier de maintenance qui ouvre le capot de maintenance afin de procéder à la maintenance de calorifugeage. Pour les maintenances régulières dans les appareils, les laines minérales sont alors recouvertes.

3.6.2 Les moyens de repérage et d'identification des laines minérales

Il n'existe pas de code ou de marquages spécifiques inscrits sur la laine minérale (aucune réglementation ne l'exige).

Il existe plusieurs méthodes utilisées pour identifier ou faire la distinction entre les diverses fibres isolantes :

- Dans un contexte d'isolation de bâtiments résidentiels ou tertiaires, la majorité des fibres impliquées concernent les laines minérales même si d'autres types de fibres

peuvent être utilisés de manière marginale. Par le passé, l'isolation pouvait faire appel à de l'amiante toujours en place. Dans un contexte industriel, les entreprises conservent normalement une trace du type d'isolation utilisée. Ainsi, une recherche de documents et de plans auprès de bureaux d'études ou de sociétés d'ingénierie, peut être utilisée pour identifier le type d'isolation retenu. Par conséquent, la formation et l'information des professionnels paraissent capitales. Le professionnel doit se référer à la fiche de données de sécurité (FDS) lorsqu'elle est disponible pour les substances et préparations (contenant un certain pourcentage de la substance) ; cependant les articles contenant des laines minérales ne présentent pas de telles fiches.

- La nature de l'application limite le nombre de choix possibles pour les laines minérales isolantes. Ainsi, une isolation de tuyaux basse température serait probablement réalisée avec des laines minérales plutôt que des FCR, ceci pour des raisons économiques. A l'inverse, un four industriel, défini par une température d'utilisation en continu de 1 200°C, ne contient certainement pas de laine de verre, laine de roche, laine de laitier ou d'amiante comme isolation de la « face chaude ». Une température de service aussi élevée nécessite l'utilisation de FCR, d'AES de « seconde génération » ou de fibres polycristallines.
- Enfin, les laines minérales peuvent être différenciées des autres fibres par analyse physico-chimique (microscopie électronique à transmission, spectroscopie à dispersion d'énergie de rayons X,¹⁴ et diffraction électronique¹⁵). Ces essais nécessitent qu'un échantillon soit prélevé et envoyé à un laboratoire pour analyse.

Le FILMM souligne que les laines minérales, définies comme étant des articles, ne présentent pas d'obligation réglementaire concernant l'élaboration de FDS. Toutefois, les producteurs ont rédigé des fiches selon les règles de l'arrêté du 9 novembre 2004 modifiant l'arrêté du 5 janvier 1993 et la norme NF ISO 11014-1. L'ACERMI, reconnue par le marché de l'isolation depuis plus de 15 ans, certifie et contrôle périodiquement les performances des produits isolants selon les EN.

3.7 Comportement des produits en service et vieillissement

Le vieillissement correspond à toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement. Cette altération peut concerner la structure chimique des substances ou des adjuvants (vieillessement chimique), la composition du matériau (pénétration ou départ de particules ou COV, ou son état physique (taux de cristallinité, fraction du volume libre, contraintes internes....)).

Le FILMM souligne que les laines minérales sont produites en respectant les normes européennes, marquées selon le marquage CE et mises en œuvre selon les prescriptions des règles de l'art du bâtiment. Les caractéristiques d'aptitude comprennent des essais avec vieillissement accéléré du fait de l'inclusion au gros œuvre des laines minérales (comportement mécanique, tenue à l'eau, tenue à la vapeur d'eau, fluage...).

Lors du retrait de produits en place ayant subi un vieillissement thermique (incendie, isolation de conduites chaudes, isolation de fours), des modifications de structure des produits peuvent apparaître.

¹⁴ Permet de caractériser la composition chimique

¹⁵ Permet de faire la distinction entre les fibres amorphes et les fibres cristallines.

Les laines de verre ramollissent aux alentours de 650-700 °C et fondent au-dessus de 850 °C. Elles ne recristallisent pas à haute température (Inserm, 1999).

Au contraire, les fibres de roche et de laitier vont se dévitrifier au-dessus de 850 °C et recristalliser. Il va se former de la pseudo-wollastonite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) et de l'anorthite ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), mais pas de cristobalite (SiO_2) (De Vuyst et al. 1995). D'un point de vue structural, elles sont stables jusqu'à 1225-1360 °C. La température d'un foyer d'incendie peut atteindre 925 °C après une heure et 1 030 °C après 2 heures (TIMA, 1991).

Notons par ailleurs que l'exposition à des températures élevées va aboutir à la dégradation des liants et des agents supprimeurs de poussières. Les concentrations moyennes en fibres dans l'air observées lors du démantèlement de calorifuges en laines minérales de tuyaux en chimie industrielle sont plus élevées que lors de la pose des isolants (0,32 - 0,22 f/ml vs 0,10 - 0,10 f/ml) (Inserm, 1999).

Pour les usages en bâtiments, la durée de vie de la laine de verre dans les murs est relativement longue. Cependant, le devenir des fibres à très long terme demeure mal connu. Après plus de 60 à 70 ans, le matelas de laine peut perdre de son épaisseur. Les fibres pourraient se dégrader en surface et se désagréger sous forme de poussières. Des risques d'exposition plus élevée que lors de la pose se poseront lors de l'enlèvement.

Antoine (2002) a évalué la capacité des matériaux fibreux à émettre des fibres tout en tenant compte du vieillissement artificiel des produits. Dans des conditions d'expositions réelles, les vitesses de vieillissement sont habituellement très lentes et ne donnent pas accès au comportement des matériaux dans un délai de temps raisonnable. C'est pourquoi des tests de vieillissement sévères, appelés vieillissements accélérés, sont appliqués pour révéler les différences de comportement entre les matériaux et accéder ainsi à l'évaluation de la durabilité.

La démarche expérimentale adoptée a consisté dans un premier temps à faire un choix des matériaux à étudier dans la gamme des produits existants. 4 matériaux de nature (verre et roche), de densité (de 10 à 150 kg/m³) et de teneur en liant (2 à 9 %) différentes ont ainsi été testés : deux panneaux et deux rouleaux respectivement en laine de verre et laine de roche. Par la suite, un protocole d'essais de vieillissement artificiel (en enceinte climatique avec des variations de la température et de l'humidité relative dans des conditions amplificatrices permettant de raccourcir le temps) susceptible d'altérer les caractéristiques physiques des matériaux isolants fibreux étudiés a été mis en place. Pour tester la capacité d'émission en fibres des produits, un banc aérodynamique, complété d'un dispositif expérimental de sollicitations mécaniques des matériaux et de prélèvements de fibres, a été développé lors de cette étude. Les conditions climatiques appliquées ont été fixées en tenant compte des variations climatiques que l'on peut rencontrer dans les combles des habitations entre les périodes estivales et hivernales, ou des conditions hygrométriques consécutives à un dégât des eaux.

Les données obtenues dans le cadre de ces expérimentations apparaissent souvent suffisamment reproductibles pour refléter le comportement du matériau considéré, sous forme de tendance. Les recherches mettent en évidence des différences de comportement, selon le vieillissement considéré, la nature, la densité, le taux de liant et l'âge du produit. Globalement, les deux types de conditions climatiques appliquées (température et humidité) semblent altérer progressivement et significativement les caractéristiques de cohésion des fibres dans les matelas de laine minérale ; la concentration en fibres libérées peut varier du simple au double au terme de dix mois de vieillissement en cycle gel/dégel. Il est intéressant de noter que les deux tiers ou plus des fibres émises sont dans la gamme des fibres alvéolaires. La cinétique de dégradation du produit semble d'autre part la plus rapide avec l'essai à saturation en humidité relative, haute température. Enfin, le vieillissement artificiel des produits entraîne généralement une diminution du diamètre géométrique moyen des fibres, de l'ordre de 15 à 50 %. L'étude met en évidence que, plus le diamètre géométrique

moyen déterminé à partir de la distribution granulométrique des fibres échantillonnées dans le matériau diminue, plus la concentration de fibres émises dans l'air augmente. Le vieillissement conduit à une émission de fibres enrichies en fines particules.

H Antoine (2002) note que pour des matériaux de même nature, les panneaux libèrent deux fois plus de fibres que les rouleaux correspondants. En revanche si l'on tient compte de la teneur en liant du produit testé et de la concentration de fibres alvéolaires, les résultats montrent que plus la teneur initiale en liant est élevée, plus le produit aura tendance à libérer une fraction importante de fibres inhalables.

Dans le cadre de la saisine FMA, l'Afsset a mandaté le CSTB et le LEPI afin d'associer leurs compétences en vue de caractériser d'une part les matériaux isolants neufs ou vieillis (prélèvement sur sites) et d'autre part les libérations des fibres sur les chantiers de retrait de laines minérales isolantes. Comme indiqué auparavant, l'étude s'attachait entre autre à caractériser le relargage en fibres des matériaux retenus dans l'étude. Elle est détaillée dans le chapitre *6.1 Exposition de la population générale*.

Le relargage a été apprécié à travers 3 modalités :

- Caractérisation des FMA émises par des matériaux isolants lors des opérations de dépose sur divers chantiers
- Caractérisation des FMA libérées par des matériaux vieillis soumis à des contraintes physiques
- Caractérisation des FMA libérées par deux dalles de faux plafond soumises à des contraintes acoustiques

Au final, pour les essais de simulation mécanique et dans le cadre des sollicitations appliquées (automatique et limitée dans le temps), il apparaît que les concentrations émises, même s'il est difficile de les extrapoler à une étude réelle de terrain, sont en général supérieures à celles mesurées sur le terrain. Par ailleurs, il apparaît que les FMA libérées tant sur les chantiers de dépose que lors des essais laboratoires sont pour la majorité alvéolaires. Les résultats des essais de sollicitations acoustiques appliquées au dalles de faux plafond n'ont, pour leur part, pas été probants.

L'étude souligne que les matériaux vieillis relâchent des quantités non négligeables de fibres au moment de leur retrait, sans doute davantage que durant leur installation. Cependant, il manque des données de libération de fibres en condition normale d'utilisation des laines minérales notamment pour les laines projetées, dans les faux plafonds ou dans les combles.

Les analyses ATG-DSC ont permis de déterminer les températures de décomposition du liant de 4 types de matériaux vieillis prélevés sur sites, avec des valeurs qui se situent entre 198 et 235 °C.

Les résultats détaillés de cette étude sont disponibles en annexe 9.

3.8 Prise en charge et traitement des déchets contenant des laines minérales

3.8.1 Déchets des industriels producteurs de laines minérales

A l'heure actuelle, les laines minérales sont entièrement recyclables et les rebuts de production pour leur plus grande majorité sont recyclés sur les sites. Pour les déchets de chantier, les circuits économiques structurés n'existent pas à ce jour pour la récupération des laines minérales.

3.8.2 Déchets des utilisateurs de laines minérales

Les déchets de chantiers en laines minérales sont classés en rubrique 17 06 04 (catalogue européen des déchets – décret de la commission du 16 janvier 2001, JO L 47 du 16 février 2001 et circulaire du 30 octobre 2002 du ministère de l'écologie et du développement durable) et sont admis en Centre d'Enfouissement Technique de classe 2 (décharge pour déchets non dangereux).

4 Les filaments continus de verre

Brevetée par la société américaine Owens Illinois au cours des années 1930, la fibre de verre constitue une avancée technologique récente de l'industrie verrière. Elle trouve des applications dans deux domaines distincts, l'isolation, avec la laine de verre et le renforcement avec les filaments de verre continus. Ces deux produits verriers se distinguent par les techniques de fabrication mises en œuvre et par les types de produits fabriqués.

La fibre de verre, obtenue par le passage du verre en fusion à travers une surface perforée de milliers de trous, est étirée pour donner du filament continu de verre nommé également fibre textile.

La définition des filaments continus de verre est la suivante : fibres dont le procédé de fabrication aboutit à une génération de matière d'une longueur suffisante pour être compatible avec une utilisation sous forme de textiles. Elles sont disposées sous forme orientées parallèles. (Inserm 1999)

4.1 Composition chimique

La fibre de verre appartient au groupe des matériaux inorganiques non métalliques, elle n'a donc pas une structure macromoléculaire linéaire comme la plupart des autres fibres mais plutôt une structure cristalline qui lui donne une grande rigidité. Les matériaux de base pour réaliser du verre sont la silice, la chaux, le kaolin, l'alumine... dont les proportions aboutissent à différents types de verres aux propriétés chimiques et physiques particulières. Chimiquement, les quatre éléments minéraux principaux proviennent de :

Sable de silice: SiO_2

Kaolin (argile): Al_2O_3

Limestone (Pierre à chaux): CaO

Minerais de bore (par exemple Colemanite) : B_2O_3

Il existe différentes familles de verres dont les plus utilisées sont exposées ci-dessous.

4.1.1 Verre E

C'est le plus utilisé (> 90%). Ses composants principaux en dehors du dioxyde de silicium sont les trioxydes d'aluminium et de bore, avec un maximum de 1% d'oxydes alcalins. Cette composition lui confère une bonne résistivité et le destine aux applications électriques, il est également très utilisé en renforcement dans les composites. Dès 1930, le fil de verre a été considéré comme l'un des matériaux du futur, de par ses qualités diélectriques ; en effet, la première application industrielle de grande échelle de la fibre de verre E, employée seule ou associée à des vernis et résines synthétiques, fut l'isolation des conducteurs électriques soumis à des températures élevées.

4.1.2 Verres S et R

A base d'aluminosilicate de magnésium ; ils possèdent une bonne ténacité et une bonne tenue à la fatigue ; ils sont donc employés dans des domaines de hautes performances mécaniques. Ce type de filament a été créé à la demande des secteurs de pointe, comme l'aviation, l'espace et

l'armement. Il répond aux spécifications de résistance des matériaux à la température ou l'humidité. Grâce à ses propriétés techniques, il peut être utilisé pour renforcer les pales d'hélicoptère, les planchers d'avion, les réservoirs de carburant de fusée, les missiles et leurs lanceurs. Développé principalement pour ces applications, il a trouvé d'autres débouchés tels que l'industrie du sport et des loisirs ou le transport et le blindage balistique.

4.1.3 Verre C

A base de borosilicate de chaux, ces verres ont une bonne tenue dans les milieux chimiques agressifs, ils sont donc utilisés dans les composites aux contacts d'acides.

Le verre C est utilisé également pour la production de voiles de verre nécessitant des propriétés de résistance à la corrosion (protection extérieure des canalisations, couche protectrice des tuyaux en composites).

4.1.4 Verre D

Une forte proportion de trioxyde de bore lui confère des propriétés électriques intéressantes, il a également une bonne tenue aux produits chimiques et aux chocs thermiques. Les filaments de verre continus à base de verre D possèdent de très faibles pertes diélectriques, ils sont donc utilisés comme matériau perméable aux ondes électromagnétiques, pour la fabrication de radômes, de fenêtres électromagnétiques, et de supports de circuits imprimés haut de gamme.

4.1.5 Verre AR

Alcali résistant, il convient particulièrement aux renforts des ciments. Il a été spécialement développé pour le renforcement des mortiers à base de ciments standards. Sa forte teneur en oxyde de zirconium lui confère une bonne résistance aux composés alcalins générés lors de la prise. Le renforcement du ciment avec des fils de verre AR lui confère un meilleur module à rupture pour une longue durée. Les moulages effectués en GRC (glass reinforcement cement/ ciment renforcé verre) sont ainsi beaucoup plus légers. Les panneaux de façade, pièces d'habillage, de décoration et le remplacement de l'amiante dans les toitures et les revêtements, sont les principales applications du fil de verre AR.

4.1.6 Verre ECR

Il est dérivé du verre E avec une plus forte concentration en trioxyde d'aluminium et toujours très peu d'oxydes alcalins ce qui donne de bonnes performances vis à vis des acides, il est très utilisé pour les renforts de plastiques.

Les tableaux ci-dessous résument les différents types de verre existants avec leurs principales propriétés.

Tableau 32: caractéristiques des différents types de verre utilisés pour la fabrication des filaments continus (NEHC 1997, TM6290.91-1 Rev. A.; Saint-Gobain VetrotexDeutschlan GmbH 2002)

| | | Composition massique en % | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|--|--|---------------------------------|------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Principaux constituants | | Verre E | Verre D | Verre A | Verre C | Verre R | Verre S | Verre AR | Verre E-CR |
| Indications générales | | usage général, bonnes propriétés électriques | usage général, bonnes propriétés électriques | Hautes propriétés diélectriques | Haute teneur en alcali | Résistance chimique | Haute résistance mécanique | Résistant en milieu basique | usage en milieu acide |
| Silice | SiO ₂ | 53 à 56 | 73 à 74 | 70 à 72 | 60 à 65 | 58 à 60 | 64 à 65 | 60 à 63 | 52 à 56 |
| Alumine | Al ₂ O ₃ | 12 à 16 | Traces | 0.5 à 2.5 | 2 à 5.5 | 23.5 à 25.5 | 24 à 25 | 0.3 à 0.7 | 10 à 16 |
| Chaux | CaO | 21 à 24 | | 5 à 10 | 12 à 14 | 14 à 17 | | 0.6 à 5.2 | 18 à 25 |
| Magnésie | MgO | 21 à 24 | 0.5 à 0.6 | 1 à 4 | 1 à 3 | 14 à 17 | 10 à 11 | 0.05 | 0 à 5 |
| Oxyde de bore | B ₂ O ₃ | 5 à 9 | 22 à 23 | 0 à 0.5 | 2 à 5.5 | | | 0.05 | |
| Fluor | F | 0 à 1 | | | | | | | |
| Oxyde de sodium | Na ₂ O | Environ 1 | 1.3 à 1.5 | 12 à 15 | 8 à 10 | | 0 à 1 | 14.8 à 15.8 | Environ 1 |
| Oxyde de potassium | K ₂ O | Environ 1 | 1.3 à 1.5 | 1 à 2.5 | | | 0 à 1 | 0.3 à 2.5 | Environ 1 |
| Oxyde de zirconium | ZrO ₂ | | | | | | | 15.8 à 19.5 | |
| Oxyde de fer | Fe ₂ O ₃ | Environ 1 | 0.1 à 0.2 | traces | | | | 0.05 | 0 à 0.5 |
| Oxyde de titane | TiO ₂ | Environ 1 | | | | | | 0.05 à 0.07 | 0 à 3 |

| Propriétés | Verre E | Verre D | Verre R | Verre AR | Verre C |
|---|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Masse volumique (densité) ρ | 2.60 g/cm ³ | 2.14 g/cm ³ | 2.53 g/cm ³ | 2.68 g/cm ³ | 2.53 g/cm ³ |
| Contrainte à rupture en traction : Filament vierge | 3400 MPa | 2500 MPa | 4400 MPa | 3000 MPa | |
| Fil imprégné dans un composite | 2400 MPa | 1650 MPa | 3600 MPa | | |
| Module d'élasticité en traction | 73000 MPa | 55000 MPa | 86000 MPa | 73000 MPa | |
| Allongement à rupture | 4.5 % | 4.5 % | 5.2 % | 4.30 % | |
| Reprise d'humidité | < 0.1 % | < 0.1 % | < 0.1 % | < 0.1 % | |
| Conductivité thermique λ | 1.0 W/m.K | | | | |
| Coefficient de dilatation linéique α (entre 20 et 100°C) | 5.10 ⁻⁶ m/m/°K | 3.5.10 ⁻⁶ m/m/°K | 4.10 ⁻⁶ m/m/°K | 5.10 ⁻⁶ m/m/°K | 94.10 ⁻⁷ m/m/°C |
| Rigidité diélectrique | 8-12 kV/mm | | | | |
| ϵ à 1 MHz | 6.4 - 6.7 | 3.85 | 6.0 | 8.1 | |
| ϵ_{tg} d δ à 1 MHz | 0.0010-0.0018 | 0.0005 | 0.0019 | | |
| Résistance à la chaleur: caractéristiques modifiées à | 300°C | | 350°C | | |
| Altération au-delà de | 600°C | | 730°C | | |
| Comportement au feu | Incombustible | Incombustible | Incombustible | Incombustible | |
| Softening point (point de Littleton) | 846°C | 775°C | 985°C | 773°C | 689°C |

4.2 Diamètre des filaments de verre continus et classement international

Le diamètre nominal des fibres de verre à filaments continus se situe entre 3 et 25 µm (De Vuyst et al, 1995) ; pour la plupart d'entre elles le diamètre nominal est autour de 6 µm et ne descend jamais en deça de 3 µm (Montelius, 2005). Le NEHC en 1997 indique que le diamètre caractéristique se situe entre 6 et 15 µm. Pour les filaments de verre continus, la distribution du diamètre est très étroite, leur méthode de production permet un contrôle précis et strict du diamètre et laisse peu de variations au produit final. A cause du diamètre assez large de ces fibres et du processus de fabrication décrit plus loin, très peu de fibres alvéolaires¹⁶ sont produites. (De Vuyst et al, 1995).

APFE (2003) remarque que les filaments de verre continus ne possèdent pas de plan de clivage qui leur permettrait de se fendre longitudinalement en des fibres de plus petit diamètre, elles ont plutôt tendance à casser en fibres de longueurs plus petites mais de diamètre identique à la fibre d'origine. Un examen microscopique des poussières issues de filaments de verre découpés puis pulvérisés finement a montré la présence de petites quantités de poussières alvéolaires. Parmi elles, on retrouve certaines ayant les mêmes propriétés que les fibres en termes de rapport longueur/diamètre. APFE annonce que les niveaux d'exposition de ces pseudo-fibres mesurés chez les membres des sociétés adhérentes se situent dans une tranche entre 50 à 1000 inférieure aux limites appliquées existantes (APFE 2003).

Le Numéro CAS des fils de verre E (celui le plus fréquemment utilisé pour la fabrication des filaments continus de verre) est 65997-17-3 (correspondant aux oxydes utilisés pour la fabrication).

Les dangers identifiés sont :

- le caractère irritant mécanique ;
- la formation de poussières non fibreuses alvéolaires (débris de tailles diverses) ou fibreuses non alvéolaires ;
- les possibilités d'allergie.

L'OMS a examiné au cours d'un Congrès en 1987 l'ensemble des travaux de laboratoire sur animaux et des études épidémiologiques réalisées sur les fils de verre textiles sous forme de filaments continus.

La conclusion a été que les filaments de verre ne sont pas classifiable quant à leur cancérogénéité. Ils appartiennent au Groupe 3 du classement de l'IARC. Cette conclusion a été confirmée par le Groupe de Travail de l'IARC en octobre 2001 ainsi que dans la dernière édition de sa monographie sur l'évaluation des risques cancérigènes sur l'homme, volume 81, « Man- made vitreous fibres » publiée en 2002.

La Commission Européenne dans sa Directive 97/69/EC du 5/12/97, 23ème adaptation de la Directive 67/548/EEC sur la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses a exonéré les filaments continus de verre d'une classification comme

¹⁶ De manière générale une fibre est une particule dont le rapport (longueur sur diamètre) L/D>3. La définition des fibres selon l'OMS les caractérise d'un point de vue réglementaire en introduisant deux critères supplémentaires. Un diamètre <3µm et une longueur >5µm. Les valeurs limites d'exposition professionnelle ne prennent en compte que ces fibres. Le terme « fibre alvéolaire » utilisé dans ce rapport correspond au terme anglais « respirable fiber » et concerne les fibres de diamètre < 3 micron

cancérogène. En effet, la note R¹⁷ de la directive 97/69/CE du 5 décembre 1997 précise que la classification cancérigène ne s'applique qu'aux fibres dont « le diamètre moyen géométrique pondéré par la longueur, moins deux erreurs types, est inférieur à 6 µm ». La pondération par la longueur du diamètre moyen géométrique permet de rendre celui-ci indépendant de la méthode de préparation de l'échantillon (Cf. Chapitre 2 : présentation des fibres minérales artificielles).

Sur la base du diamètre des fils continus, les industriels se référant à la note R considèrent qu'ils ne sont pas concernés par le classement comme cancérogène de l'union européenne prévue par la directive 97/69/EC. Les différents pays de l'Union Européenne ont transposé cette Directive dans leur droit national, en adoptant les mêmes conclusions :

Les organismes officiels américains OSHA (Occupational Safety and Health Administration) et NTP (U.S.National Toxicology Program) n'ont pas listé les fils de verre à filaments continus comme des substances dangereuses et l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) leur a accordé le classement A4 (non classable comme cancérigène pour l'homme). Ils ne font pas partie de la liste des produits contrôlés selon la loi canadienne (CPR).

Une FDS fournie par Saint Gobain est donnée à titre d'exemple en annexe 10.

4.3 Processus de fabrication

Les matières premières, produits de carrières, dont les gisements sont sélectionnés en fonction de leur composition (silice, alumine, chaux, etc.), sont, en général, achetées broyées à une très faible granulométrie pour obtenir un mélange homogène et faciliter la fusion. À leur arrivée, elles sont contrôlées et analysées. Le dosage de ces différentes matières est formulé, à partir des résultats des analyses, de façon à obtenir la composition du type de verre choisi, puis contrôlé, matière par matière, avant l'envoi de ces dernières aux mélangeurs (EIPPCB 2001).

Sur les lignes de production actuelle, le dosage de ces différentes matières est automatisé et géré par ordinateur, ce qui garantit une certaine constance dans la composition.

4.3.1 La fusion

Le procédé de fusion directe est réalisé dans un four à haute température. La figure 31 en donne un exemple. Affiné, le verre s'écoule directement à travers des canaux thermorégulés, qui alimentent les filières de fibrage.

Dans un ancien procédé dit de fusion de billes, parfois encore utilisé pour des productions spéciales, le verre était coulé, fragmenté, mis sous forme de billes et refroidi. Les billes étaient ensuite reprises séparément, pour alimenter des filières indépendantes du four, où elles étaient refondues pour permettre le fibrage.

La fusion du mélange vitrifiable et l'élaboration du verre fondu réclament des températures élevées (1550 à 1600 °C pour les verres de type E, et plus encore pour ceux de type R ou S). Ces températures impliquent l'usage de réfractaires spéciaux (oxydes de chrome, de zirconium, etc.). Les fours actuels ont des capacités de fusion de plusieurs dizaines de milliers de tonnes par an (Bouchat 2003; EIPPCB 2001).

¹⁷ Note R : La classification comme cancérigène ne doit pas s'appliquer aux fibres dont le diamètre moyen géométrique pondéré par la longueur moins deux erreurs types est supérieur à 6 µm

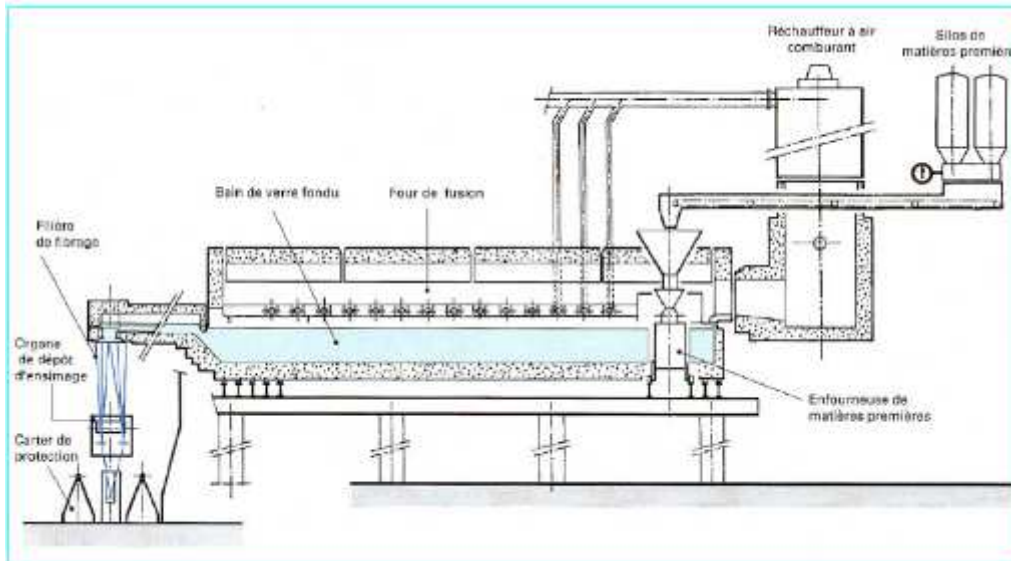


Figure 31: ligne de fibrage par fusion directe (Guillon 1995)

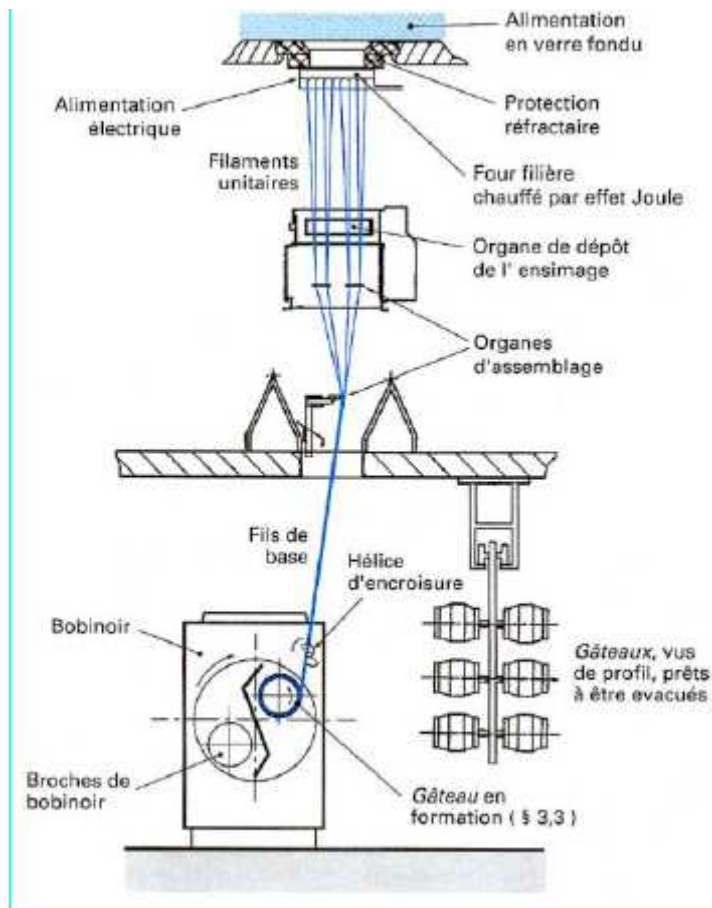


Figure 32 : ligne de fabrication de fil silionne (Guillon, 1995)

4.3.2 Fibrage

Il s'effectue au moyen de filières dont le principe est représenté sur la figure 31. Ces filières sont en alliage de platine pour résister aux températures de fibrage qui sont de l'ordre de 1 250°C pour les verres de type E. On réalise un chauffage réglé avec précision par effet Joule.

Le verre fondu arrivant du four remplit la filière et s'écoule par gravité à travers des orifices calibrés (*tétons*), de 1 à 2 mm de diamètre, pratiqués dans le fond de filière.

4.3.3 Étirage

La température de filière et la vitesse d'étirage déterminent le diamètre des filaments qui varie entre 3,5 à 24 microns et ce, en fonction des produits à réaliser. Pour certains des fils, la vitesse d'étirage est de l'ordre de 175 km/h.

À la sortie des tétons, le verre est simultanément étiré à grande vitesse (plusieurs dizaines de mètres par seconde) et refroidi.

L'étirage est généralement réalisé mécaniquement par enroulement sur la broche d'un bobinoir (figure 32) et donne naissance à des filaments continus.

L'ensemble des filaments parallèles issus d'une même filière, séparés ou non en sous-ensembles (*splittage*), sont assemblés en un ou plusieurs fils de base encore dénommés fils *silionne*.

Il existe également un procédé d'étirage par voie pneumatique qui donne naissance à des filaments discontinus rassemblés en un ruban continu, la *verranne*.

Le diamètre des filaments désiré est obtenu par le réglage des paramètres suivants :

- le diamètre des tétons et les températures de filière lors du fibrage ;
- la vitesse d'étirage et la vitesse de refroidissement lors de l'étirage.

Le nombre de filaments assemblés en parallèle, leur diamètre et la masse volumique du verre définissent la *masse linéique* (ou titre) du fil de base. Il faut préciser un point de terminologie utilisé très fréquemment lors du commerce de ces fibres : la taille du fil de verre se mesure en tex. La grosseur d'un fil est caractérisée par un poids pour une longueur donnée. Le tex signifie que 1000 m de fil de base pèsent 1 gr. Le tex, unité de masse linéique, s'exprime ainsi :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg.m}^{-1} = 1 \text{ g.km}^{-1}$$

Le tableau 33 établit les correspondances entre les diamètres des filaments, le nombre de filaments par fil de base et les masses linéiques des fils de base, pour des verres de masse volumique comprise entre 2 550 et 2 600 kg.m⁻³ environ. Ce tableau n'est pas limitatif.

Il s'agit là des fils de base les plus couramment commercialisés (Guillon, 1995).

Tableau 33: masses linéiques (en tex) des fils de base commercialisés en fonction du diamètre et du nombre de filaments

| Diamètre nominal des filaments en μm | Nombre approximatif de filaments par fil de base | | | | | | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 | 800 | 1600 | 2000 | 4000 |
| 5 | 2.8 | 5.5 | 11 | | | | | | | |
| 7 | | 11 | 22 | | | | | | | |
| 9 | | | 34 | 51 | 68 | 102 | 136 | | | |
| 10 | 10 | 20 | 40 | | 80 | | 160 | | | |
| 11 | 12.5 | 25 | 50 | | 100 | | 200 | | | |
| 13 | | | | | 136 | | 272 | | | |
| 14 | | | 75 | | 150 | | 300 | 600 | | |
| 17 | | | | | | | | | 1200 | 2400 |
| 19 | | | | | | | 600 | 1200 | | |
| 24 | | | | | | | | | 2400 | 4800 |

4.3.4 La protection du fil

L'effet mécanique de l'étirage et du bobinage n'est pas suffisant pour rassembler durablement les filaments en un fil ou en un ruban de fibres. Le verre est trop lisse pour s'agglomérer. De plus, il est sensible au frottement, à l'abrasion et à l'électricité statique, des phénomènes qui risquent de s'amplifier lorsqu'il sera procédé au tissage ou aux transformations ultérieures.

A la sortie de la filière, les filaments reçoivent un revêtement de surface protecteur appelé ensimage (Sizing pour le traitement, size pour le produit), celui-ci a pour but :

- de lier les mono filaments de base et les agglomérer entre eux pour qu'ils forment les filaments d'un même fil ;
- de les revêtir d'une pellicule lubrifiante, pour protéger le filament au cours de la fabrication en tissu ;
- de favoriser la liaison entre le verre et les résines synthétiques au moment de la stratification.

Un schéma fourni par Saint Gobain illustrant le processus global de fabrication des filaments de verre continus se trouve en annexe (Cf annexe 11).

4.4 Composition de l'ensimage

L'ensimage doit remplir plusieurs fonctions parfois contradictoires. Sa composition chimique fait partie des secrets de fabrication de chaque producteur. Cependant, pour chaque type d'ensimage, des familles de constituants sensiblement identiques sont retrouvées (Caramaro L. 2006). Les ajouts les plus typiques sont :

- des films de polyacétate de vinyle, de polyuréthane, des résines époxy, de l'amidon ;
- des agents de couplage portant des groupes fonctionnels silanes ;
- des régulateurs de ph : acide acétique, acide chlorhydrique et sels d'ammonium ;
- des lubrifiants, tels des huiles minérales ou des silicones.§

Pour des raisons liées au procédé de fibrage de la fibre de verre, les ensimages doivent nécessairement former une émulsion aqueuse très stable. Le type d'ensimage appliqué sur le verre est une des caractéristiques qui différencie les produits. Il existe essentiellement deux grandes familles d'ensimage : les textiles et les plastiques. Leur composition dépend des applications ultérieures du filament continu de verre.

4.4.1 L'ensimage plastique

Appliqué aux fibres, il consiste à déposer un agent de pontage dont le rôle est d'assurer une liaison physico-chimique entre les fibres et la résine puis de protéger la fibre de son environnement.

Les ensimages plastiques contiennent :

- des agents filmogènes collants (polymères), qui apportent l'intégrité (cohésion des filaments entre eux), la raideur, la protection contre l'abrasion, la facilité d'imprégnation par la matrice ;
- des lubrifiants, ce sont des tensioactifs cationiques ou non-ioniques qui ont pour rôle de réduire la friction entre les fibres et de limiter la création de défauts de surface. Ils favorisent la répartition de l'ensimage à la surface du verre, participent à sa protection contre l'abrasion et facilitent aussi l'imprégnation.
- des agents de pontage (silanes, en général), qui assurent la liaison chimique entre le verre et la matrice et, de ce fait, renforcent les propriétés mécaniques et la tenue au vieillissement ;
- dans certains cas, des antistatiques ;
- divers autres composants (agents mouillants, colloïdes, plastifiants, etc.) nécessaires à la stabilisation des ensimages.

Mécanismes d'adhésion

Les phénomènes qui concernent l'interface entre une fibre de verre et une matrice sont complexes et font l'objet de nombreuses études.

Les silanes sont connus pour être de bons agents de couplage fibre-matrice. Chimiquement les réactions qui se produisent sont les suivantes : de manière simplifiée, la surface du verre est riche en groupes hydroxyle Si-OH et Al-OH. Le silane, après hydrolyse, réagit avec la surface du verre (figure 33) avec élimination d'eau. Il y a donc liaison chimique entre l'agent de pontage et le verre grâce à la formation d'un pont siloxane Si-O-Si.

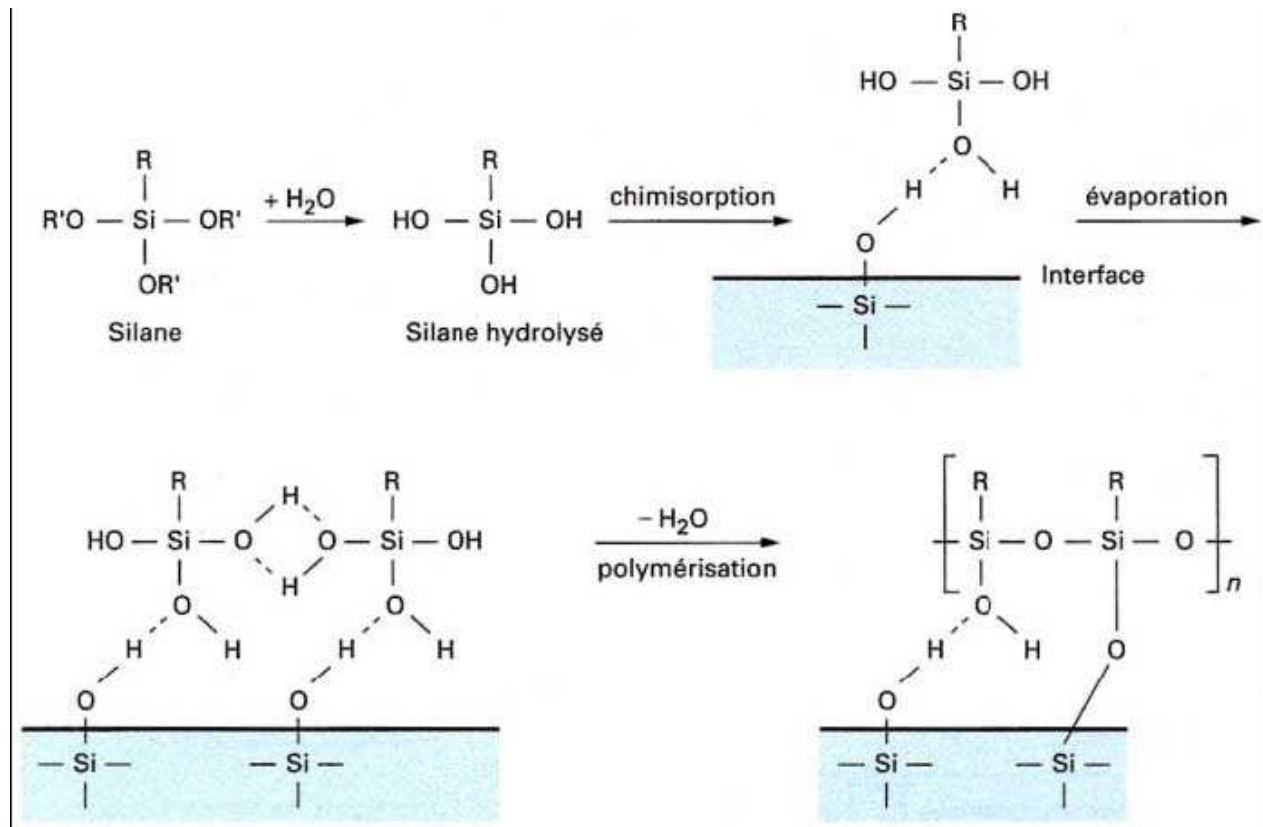


Figure 33: mécanisme d'adhésion des silanes (Guillon D, 1995)

Les organo-silanes représentent en général moins de 0.05% de la masse du Verre E ensimé.

Ces produits figurent sur les listes de produits nécessitant à l'état pur un étiquetage de produit dangereux par exemple en Europe R23/25 toxique par inhalation ou ingestion, R21 nocif par contact avec la peau, R36 irritant pour les yeux). Leur très faible concentration et le fait qu'ils soient polymérisés ou qu'ils aient réagi lors des opérations de fabrication de fibres de Verre E conduisent le fabricant à considérer leur risque comme négligeable.

Ce sont des produits en général irritants pour la peau et les muqueuses (Caramaro L. 2006, Kizer, 1984).

4.4.2 L'ensimage textile

L'ensimage "textile" appliqué sur les filaments, en sortie de filière consiste à déposer un agent de liaison assurant la cohésion des filaments entre eux, facilitant les manipulations ultérieures et évitant la formation de charges électrostatiques. Il est en général incompatible avec les systèmes de résine d'imprégnation.

Les ensimages textiles ne sont utilisés que pour conférer aux fils les qualités de résistance à l'abrasion et de glissant nécessaires aux opérations textiles (tissage, tressage, tricotage, etc.). Ils doivent pouvoir ensuite être enlevés aisément par traitement thermique (désensimage).

De composition plus simple, ils contiennent principalement :

- des agents filmogènes collants (amidons en général) ;
- des agents lubrifiants (incompatibles avec la matrice) ;
- des agents adoucissants ;

- des agents mouillants.

Le tissu reçoit ensuite un ultime traitement de surface, appelé finish, qui assurera la compatibilité fibre de verre/matrice.

Les ensimages textilo-plastiques assurant la mise en oeuvre textile et ne nécessitant pas de désensimage (opération coûteuse) se rapprochent de la composition des ensimages plastiques.

Les mélanges utilisés pour l'ensimage sont constitués de polymères de haut poids moléculaire, non réactifs dispensés de figurer sur la plupart des listes des différents pays, dont en particulier la liste EINECS (European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances) des substances chimiques existantes établie en 1981, et ses additifs ELINCS (European List of Notified Chemical Substances). D'autre part, ils sont dans la plupart des cas exemptés d'enregistrement dans les listes américaines TSCA (Toxic Substances Control Act).

Dans certains cas, des polymères ayant des sites ou contenant des monomères réactifs peuvent être utilisés lors de la préparation de l'ensimage. La majorité de ces sites réactifs réagit lors du procédé de fabrication des fils de verre. Cependant, il peut subsister une certaine réactivité des fils, qui justifie certaines précautions d'emploi données dans la fiche de données de sécurité (Voir les FDS mises en annexe).

4.5 Les renforts en verre textile

Un fil est défini par son diamètre, de 5 à 14 microns, par sa masse linéique ou nombre de tex (g/km), par le sens de la torsion et le nombre de tours par mètre.

Le présent paragraphe a pour but de décrire les principaux types de renforts en verre textile disponibles sur le marché, de préciser les principaux usages de chacun, et de fournir les éléments techniques nécessaires à leur définition exacte et, lorsqu'elles existent, les désignations normalisées. (Caramaro L. 2006, Guillon D 1995, Wallenberger FT, 2000)

4.5.1 Désignation des fils de verre textile

On peut citer (d'après la norme **ISO 2078**) comme exemple de désignations :

fil de baseEC9 34 + code

fil simpleEC9 34 Z40 + code

fil retors.....EC9 34 Z40 x 2 S 150 + code

fil câblé.....EC9 34 Z40 x 2 S 150 x 3 Z80 + code

filé verranne..... ED7 125 + code

La signification de cette désignation est détaillée dans le tableau 34.

Le code producteur désigne généralement le type d'ensimage (textile ou textilo-plastique dans ce cas).

Tableau 34: Désignation des fils de verre textile (Guillon D, 1995)

| EMPLACEMENT SUCCESSIF DANS LE CODE | POSSIBILITÉS | SIGNIFICATION |
|------------------------------------|-----------------|--|
| Première lettre | E-D-A-C-R-S | Désignation du verre utilisé |
| Deuxième lettre | C ou D | Type des fils utilisés : - continu pour les fils silionne - -discontinu pour les filés verrane |
| Nombre à un ou deux chiffres | Par exemple 9 | Diamètre nominal du filament exprimé en micromètres |
| Nombre | Par exemple 34 | Masse linéique du fil exprimée en tex |
| Lettre | Z ou S | Sens de la première torsion |
| Nombre | Par exemple 40 | Valeur de la première torsion exprimée en tours par mètre (fils simples) |
| x Nombre | Par exemple x 2 | Nombre de fils simples identiques composant un fil retors |
| Lettre | Z ou S | Sens de la deuxième torsion |
| Nombre | Par exemple 150 | Valeur de la deuxième torsion exprimée en tours par mètre (fils retors) |
| x Nombre | Par exemple x 3 | Nombre de fils retors identiques composant un fil câblé |
| Lettre | Z ou S | Sens de la troisième torsion |
| Nombre | Par exemple 80 | Valeur de la torsion de câblage exprimée en tours par mètre (fils câblés) |

4.5.2 Fils textiles

Rappelons que ces produits sont appelés ainsi car ils ont reçu un ensimage textile qui les destine à la production de renforts tissés ou rubans tissés, *silionne*, dont il est indispensable de connaître les éléments constitutifs.

4.5.2.1 Fils simples (ou fils silionne)

Ils sont obtenus par enroulement des fils de base sur des tubes supports (*cops*) adaptés aux matériels de transformation textile. Au cours du transfert, les fils de base reçoivent une torsion, de sens déterminé, généralement Z et de quelques dizaines de tours par mètre (20 à 40 tr. m⁻¹), qui leur donne davantage de tenue et d'élasticité.

4.5.2.2 Fils retors

Ce sont des fils constitués de deux ou plusieurs fils simples (chacun d'eux étant *remonté* en torsion, par exemple 160 tr/m, dans le même sens que pour le fil de base), assemblés et retordus ensemble, dans le sens inverse à celui de la torsion des fils de base, à une valeur par exemple de 150 tr/m, et présentés sur des nouveaux tubes supports.

4.5.2.3 Fils câblés

Ce sont des fils constitués de deux ou plusieurs fils retors (ou éventuellement fils retors et fils simples), retordus ensemble, présentés sur des nouveaux tubes supports.

4.5.2.4 Filés verranne

Ils sont obtenus par application d'une torsion aux rubans *verranne* de base. Ils sont présentés sur des tubes supports.

Les filés verranne entrent dans l'élaboration de certains tissus, généralement associés avec des fils *sillionne*, pour améliorer la résistance interlaminaire des composites, donner plus d'aptitude au formage et de prise de résine.

4.5.3 Tissus et rubans tissés, sillionne

Le fil de verre sillionne (simple, retors ou câblé) offre les mêmes possibilités de tissage que les autres fibres naturelles ou synthétiques, à condition d'utiliser des moyens adaptés.

Les paramètres déterminants sont :

- la désignation des fils de chaîne et de trame ;
- la contexture du tissu (type d'armure et nombre de fils au centimètre en chaîne et en trame, qui définissent l'épaisseur et la masse surfacique) ;
- l'ensimage ou le traitement *finish* pour la sélection desquels il y a lieu de préciser la nature chimique de la matrice à renforcer (polyester, époxyde, phénolique, etc.) ;
- la largeur en centimètres.

Les tissus sillionnes sont généralement commercialisés en largeurs voisines ou un peu supérieures au mètre, les rubans en petites largeurs d'environ quelques centimètres. Leurs masses surfaciques se situent environ entre 50 et 500 g/m². Ils sont présentés en rouleaux de grandes longueurs (plusieurs centaines de mètres, selon les masses surfaciques), bobinés sur supports tubulaires.

Les principales motivations pour l'utilisation de tissus sillionnes comme renfort sont :

- leur facilité de manipulation et de mise en œuvre, tout en conservant une certaine déformabilité fonction de la contexture ;
- la régularité de masse surfacique et d'épaisseur, particulièrement appréciable pour les faibles valeurs ;
- la continuité des fibres ;
- la maîtrise du positionnement directionnel (de la trame ou de la chaîne) selon la direction des contraintes sur les pièces à renforcer ;
- la possibilité d'obtention de taux de renfort élevés, jusqu'à 70 % en masse du composite.

Les tissus sillionnes sont utilisés toutes les fois qu'il y a besoin de résistance élevée, de souplesse et de légèreté ou de très grande précision dans les caractéristiques, entre autres électriques.

On peut citer les supports de circuits imprimés et multicouches, les pots de coupure (disjoncteurs), les cannes à pêche, les bateaux et carrosseries de compétition, etc.

4.5.4 Stratifils (ou rovings)

Il en existe différents types. L'ensimage dans ce cas est toujours de type plastique.

Le type *assemblé* est obtenu par assemblage en parallèle de plusieurs fils de base et bobinage sous forme de pelotes et de bobines (sur tube support) cylindriques, de masse pouvant aller de quelques kilogrammes à plusieurs dizaines de kilogrammes.

Les stratifils assemblés peuvent être utilisés :

- en continu pour la confection des tissus stratifils et pour les procédés de moulage par enroulement, par pultrusion, etc. ;
- coupés, pour la confection des mats (feutres) et pour les procédés de moulage par projection, par centrifugation, etc.
- Le type *direct* ou multifilament est bobiné directement sous la filière, en lieu et place du *gâteau* de fil de base.

Les stratifils directs sont seulement utilisés en continu dans la confection des *tissus stratifils* ou dans les procédés de moulage par enroulement, par pultrusion, etc.

Les paramètres déterminants sont :

- la masse linéique globale ;
- l'ensimage;
- la présentation ;

et, pour certains usages :

- le diamètre des filaments ;
- la masse linéique des fils de base constitutifs.

On utilise généralement la désignation dite globale du type EC 14 4 800 + code (tableau 34).

Certains fabricants mentionnent également la masse linéique des fils de base.

Les caractéristiques des produits commercialisés sont mentionnées ci-dessous.

Les diamètres nominaux des filaments vont en général de 10 à 24 μm ; les masses linéiques de 300 à 4 800 tex pour les stratifils directs, au-delà pour les stratifils assemblés.

Les ensimages plastiques utilisés pour les stratifils sont spécifiques de l'emploi du stratifil et du procédé de moulage sélectionné pour la mise en œuvre du plastique renforcé. Il en existe deux catégories :

- ceux mis en œuvre sous leur forme continue, destinés aux procédés de moulage par enroulement, pultrusion, etc., ou au tissage ;
- ceux, mis en œuvre par coupe, destinés à la fabrication de mats et aux procédés de moulage par projection simultanée et par imprégnation en continu.

4.5.5 Stratifils bouclés (ou spun roving)

C'est un cas particulier de stratifil dont une partie des fils de base ou des filaments constitutifs forme des boucles. Ces boucles améliorent la résistance interlaminaire des composites. Les stratifils bouclés sont utilisés, sous forme de tissus, ou lors du moulage par pultrusion.

4.5.6 Tissus

4.5.6.1 Tissus stratifils ou rovings

Confectionnés à partir de stratifils, les tissus stratifils ont des structures plus grossières et des masses surfaciques plus élevées (150 à 1000 g/m^2) que les tissus silionnes. L'avantage pour les industriels est que les stratifils étant porteurs d'un ensimage plastique, ces tissus ne réclament ni désensimage ni traitement de *finish* contrairement aux tissus silionnes textile.

Les tissus stratifils sont utilisés en tissu seul ou en association avec les mats dans les procédés de moulage au contact, ou comme renfort complémentaire dans les procédés de

moulage par enroulement, pultrusion, etc. Les tissus stratifiés légers peuvent aussi, dans certains cas, se substituer à des tissus silionnes.

4.5.6.2 Tissus cousus, tricotés

Les nappes de fils, chaînes et trames, ne sont plus entrelacées mais posées l'une sur l'autre. Les nappes sont liées entre elles au moyen d'un fil de couture.

Un des avantages de ces tissus est leur flexibilité :

- les nappes peuvent avoir des orientations différentes de 0 à 90° permettant de choisir celles-ci en fonction de l'orientation des contraintes principales ;
- il est possible d'avoir des structures épaisses, le nombre de couches que l'on peut lier ensemble pouvant aller jusqu'à 8.

Un autre avantage concerne la non-déformation des fils (*zéro embuvage*) qui confère de meilleures performances mécaniques.

Par ailleurs, ce type de structure permet d'obtenir des renforts tissés s'adaptant aisément à des conformations de formes complexes.

4.5.7 Mats

Les mats sont des nappes constituées de filaments ou de fils de base, continus ou coupés, généralement distribués de façon aléatoire dans le plan et maintenus ensemble par un système de liage approprié. Ils sont présentés en rouleaux sur tubes supports dans une très large gamme de masses surfaciques, de largeurs et de qualités fonction des différentes applications.

La désignation est du type : code – 450 –125.

Le code producteur identifie l'ensemble des caractéristiques spécifiques (ensimage, liant, etc.), 450 la masse surfacique en grammes par mètre carré et 125 la largeur en centimètres.

4.5.7.1 Mats de fils coupés

Ils sont constitués de fils de base coupés, de longueurs comprises entre 25 et 100 mm.

Les propriétés des mats sont fonctions des caractéristiques :

- des fils de base (masse linéique, ensimage, longueur de coupe) ;
- du système de liage qui peut être soit chimique avec un liant organique (liquide ou en poudre, soluble ou non par la résine d'imprégnation), soit mécanique par aiguilletage.

Les masses surfaciques standards vont de 100 à 900 g/m². Les largeurs maximales sont de 3 m, ou légèrement supérieures.

Les mats avec liants en poudre très solubles, donc déformables, sont utilisés en moulage au contact. S'imprégnant parfaitement, ils s'appliquent aussi au moulage de plaques en continu, au moulage par enroulement (couches anticorrosion), etc.

Les mats avec liant liquide, utilisables pour les mêmes applications que ci-dessus, sont de manipulation plus aisée et les surfaces sont mieux liées, mais leur translucidité est plus faible.

Les mats avec liants en poudre peu solubles sont destinés aux moulages à la presse et injection de résine liquide. Des taux de liant plus ou moins élevés permettent de maintenir parfaitement les fils, même sous des flux de résine à des vitesses ou des viscosités élevées.

Les mats aiguilletés permettent de s'affranchir d'un liant chimique lorsque celui-ci pourrait être incompatible avec la résine.

4.5.7.2 Mats de fils continus

Ils sont constitués de fils de base continus. Ces mats sont obtenus directement sous les filières de fibrage. Les paramètres variables (masse surfacique, largeur) sont sensiblement les mêmes que ceux des mats de fils coupés.

Ces mats sont caractérisés par un volume apparent plus important et une grande déformabilité par étirage des fils bouclés.

Inaptes au moulage au contact, ils sont très bien adaptés aux procédés de moulage entre moule et contre-moule avec résine liquide : RTM (*Resin Transfer Molding*), S-RIM (*Structural-Reaction Injection Molding*), de compression de plaques à la presse, de renforcement des mousses et de pultrusion.

4.5.7.3 Mats de surface et Overlay

Ils sont constitués de filaments coupés ou continus, répartis en nappe et liés. Leur structure est de ce fait beaucoup plus fine et les masses surfaciques sont faibles (quelques dizaines de grammes par mètre carré). Les mats de surface sont en général très liés et peu déformables, les *Overlay* peu liés et très déformables. Les mats de surface et les *Overlay* sont utilisés dans les différents procédés de moulage pour améliorer les qualités de surface des pièces (aspect, résistance au vieillissement, à la corrosion, etc.).

4.5.7.4 Fils (de base) coupés

Comme leur nom l'indique, ce sont des fils de base coupés en longueurs relativement faibles (3; 4,5; 6; 12 et 25 mm sont les longueurs de coupe les plus courantes). Ils sont commercialisés en sacs doses de quelques dizaines de kilogrammes ou en conteneurs de plusieurs centaines de kilogrammes.

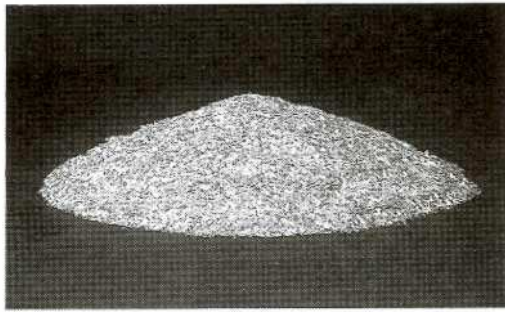
La désignation est du type EC14 75 3 mm + code (EC14 75 : désignation du fil de base, 3 mm : longueur de coupe, le code producteur identifie les propriétés spécifiques du produit).

Les principales applications sont le renforcement des résines thermoplastiques par extrusion/injection, le renforcement des prémix (BMC ou *Bulk Molding Compound*), du plâtre, du ciment, du papier, la fabrication de non-tissés (voiles) par procédés papetiers. À chaque application ou matrice correspond un ensimage plastique spécifique.

4.5.7.5 Fibres broyées

Elles sont obtenues par broyage, plus ou moins poussé, de fils de base, qui détermine leur longueur, de 0,1 à 0,5 mm. Les plus longues se présentent sous forme de nodules duveteux, les plus courtes en poudre. Elles peuvent être sans ensimage (fibre à l'eau) ou avec ensimage, celui-ci étant alors fonction de l'application. Les fibres broyées trouvent leurs applications dans le renfort des thermoplastiques, en particulier PTFE (polytétrafluoroéthylène), de résines de coulée, de mastics, de mousses par le procédé R-RIM (*Reinforced-Reaction Injection Molding*).

Les figures 34 et 35 récapitulent schématiquement tout ce chapitre via la présentation des différents produits en verre textile (fig 34) et un récapitulatif du procédé de fabrication des filaments de verre continus (fig 35).



a) fils coupés



b) fibres broyées



c) mat à fils continus



d) mat à fils coupés



e) stratifil (roving)



f) stratifil (roving) bouclé



g) fils textiles sur tube support (cops)

Figure 34: présentation des différents produits en verre textile (Guillon D, 1995)

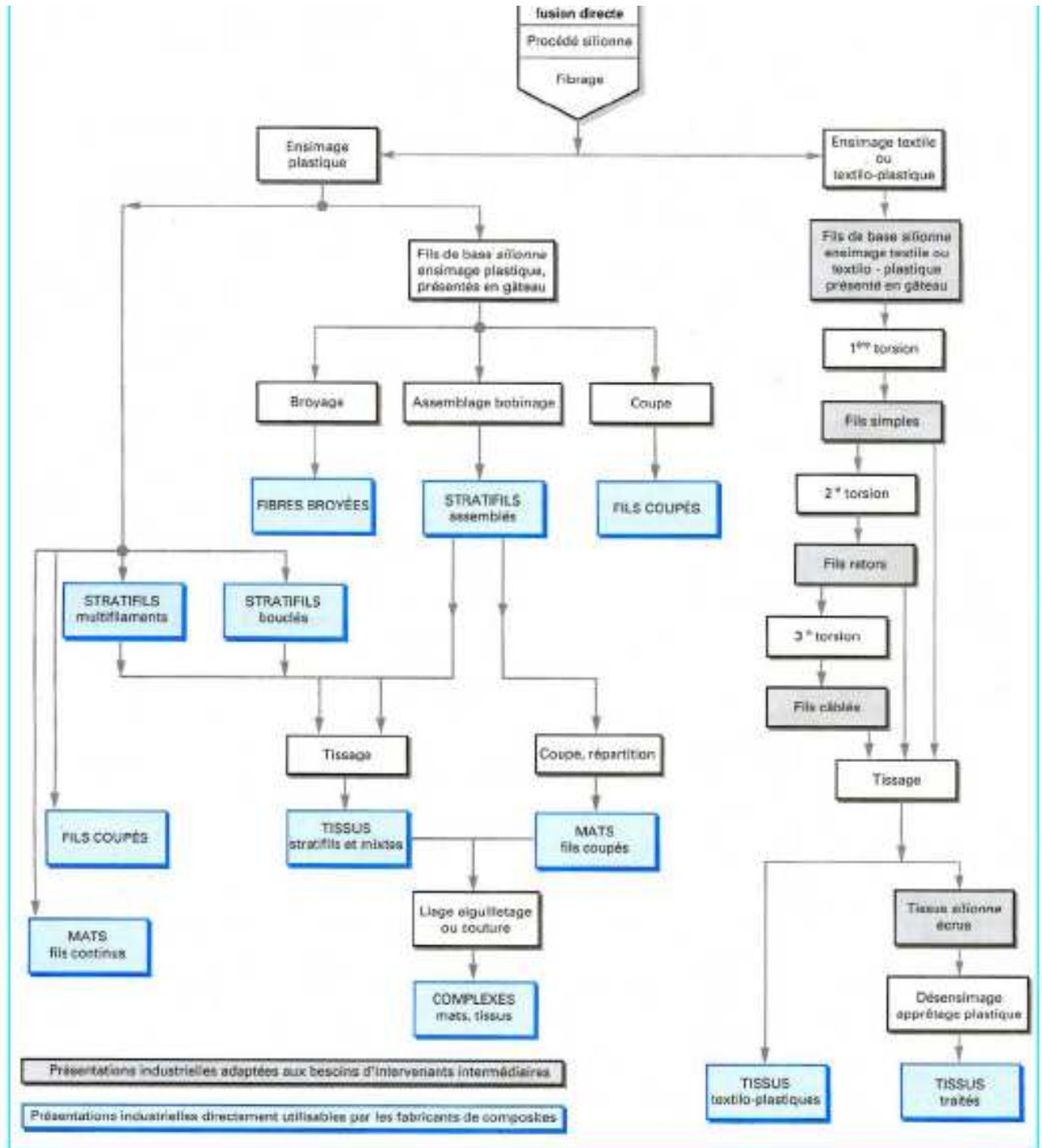


Figure 35: récapitulatif du procédé de fabrication des filaments de verre continus (Guillon D, 1995)

4.6 Place des filaments de verre continus dans les matériaux composites

Un matériau composite résulte d'un assemblage d'au moins deux corps non miscibles à structure différente dont les qualités individuelles se combinent en donnant un matériau hétérogène dont les performances globales sont améliorées. (Weiss & Bord , 1983).

L'un de ces composés est le renfort fabriqué dans plus de 85% de cas à partir de filaments continus de verre.

L'intérêt d'un matériau composite est de combiner les avantages des constituants pour obtenir un matériau plus performant que les composites pris isolément ; le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas.

Les composites Fibres-Résine sont les plus répandus. Ils sont constitués :

- d'une ossature conçue jusqu'à 90% en volume de filaments appelée renfort ; c'est cette armature qui assure la tenue mécanique ;
- d'une protection : la matrice, qui lie les fibres renforts et répartit les efforts. Elle assure la protection chimique et assure la cohésion et l'orientation des fibres. Elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les matériaux ainsi obtenus sont *hétérogènes* et *anisotropes*.

Dans cet univers disparate, les composites à matrice organique (appelés également de grande diffusion), issus de matières plastiques thermodurcissables ou thermoplastiques forment l'essentiel des composites actuellement utilisés (99 %).

La fibre de verre sous forme de filament continu constitue la majorité des renforts utilisés pour les composites grande diffusion.

Le renfort, en fibres de verre à filaments continus, forme une fraction volumique comprise, le plus souvent, entre 30 % et 70 % dans le matériau composite (rapport du volume de fibres au volume total du composite) (Berreur, 2002; Caramaro L. 2006)

L'étude de filière industrielle des composites, telle qu'elle est décrite sur le site du GPIC (Groupement de la plasturgie industrielle et des composites), montre que tout au début de la chaîne se situent les producteurs de renfort, viennent par la suite les fabricants de semi produits, ensuite les transformeurs et enfin les utilisateurs (cf figure 36).

Cette chaîne n'est pas toujours respectée puisqu'un producteur de renforts peut également être fabricant de semi produits voire transformeur.

C'est ce qui a été constaté pour les deux seuls fabricant de filaments de verre continus identifiés sur le territoire français que sont Owens Corning et Saint Gobain Vetrotex.

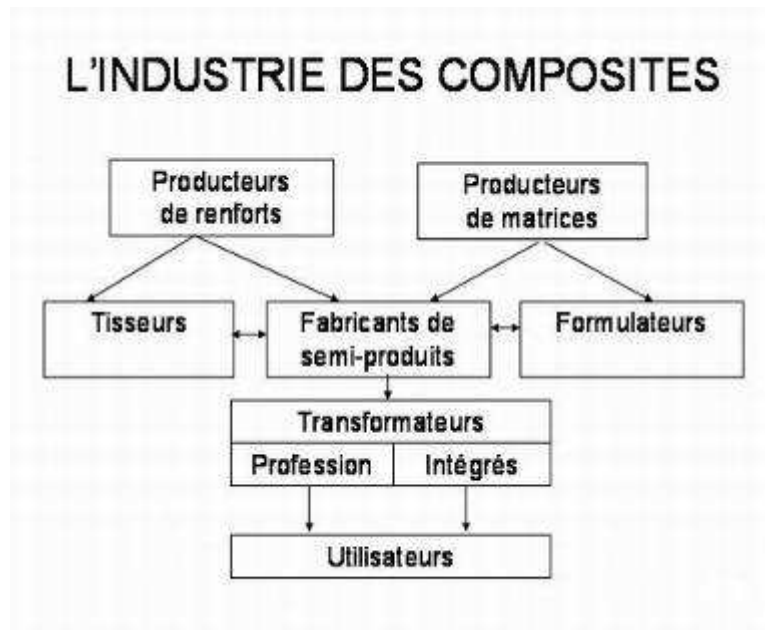


Figure 36: descriptif de la filière des professionnels dans le champ des composites (GPIC 2008)

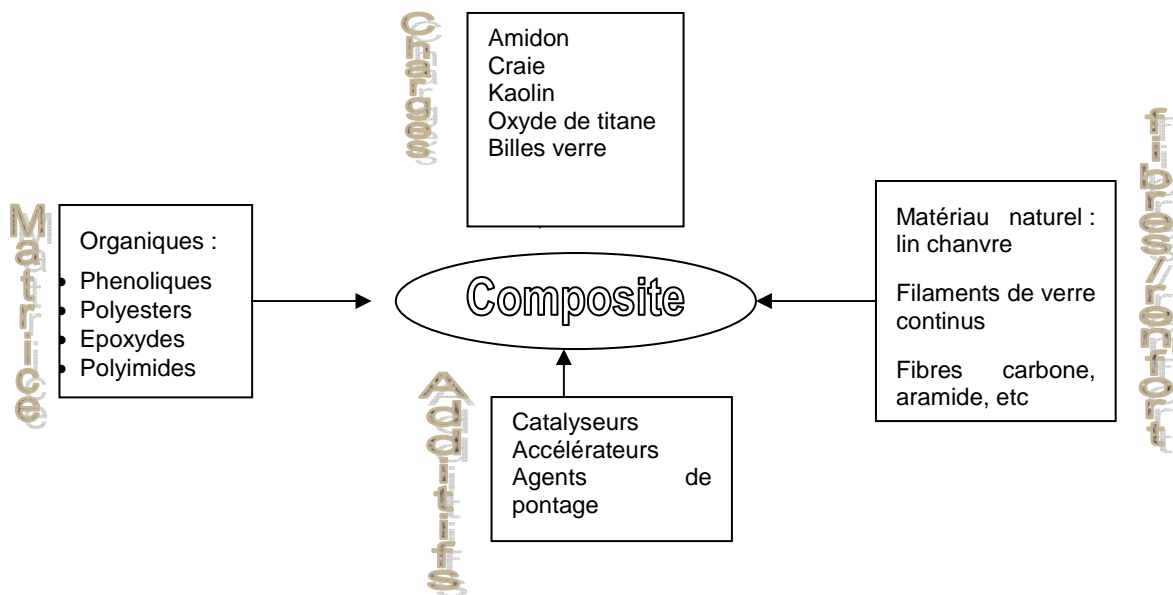


Figure 37: les différents éléments constitutifs d'un composite (Bahlouli N 2008)

Comme expliqué plus haut, la principale utilisation des fibres de filaments de verre continus est le renfort dans les matériaux composites. Pour arriver à ce résultat, plusieurs éléments doivent être additionnés aux deux composés de bases que sont la matrice et le renfort (Cf figure 37). Dans ce qui suit, sont décrits les éléments ajoutés aux résines c'est-à-dire les charges, puis les résines elles mêmes. Le renfort en filaments de verre continus ainsi que l'ensimage qui lui est additionné ayant déjà fait l'objet d'une description dans le paragraphe précédent. Une dernière partie traitera des plus importantes techniques de fabrication actuellement utilisées pour produire un matériau composite.

4.6.1 Les résines (matrices)

La matrice lie les fibres du renfort entre elles et assure la répartition de la contrainte. C'est "l'emballage". Elle assure également une protection chimique contre la corrosion par exemple.

On distingue plusieurs familles décrites dans la figure 38:

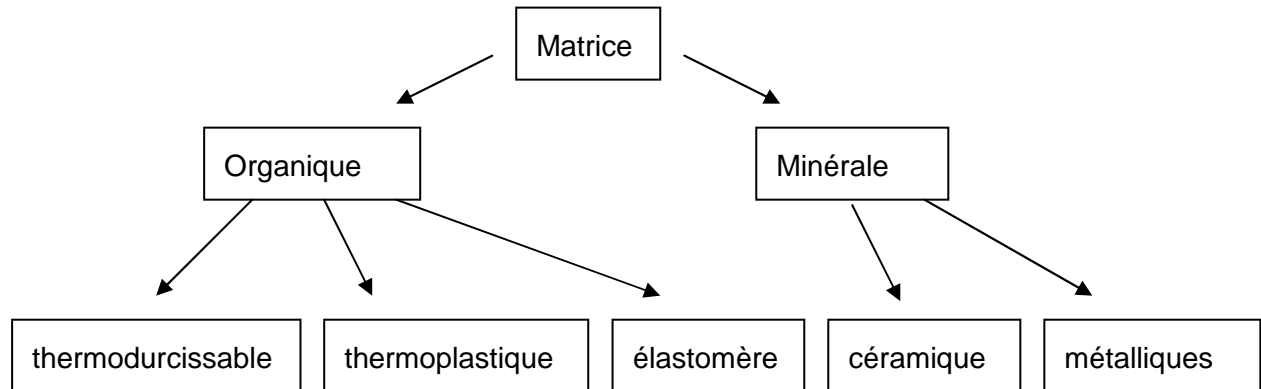


Figure 38: les différentes familles de matrices utilisées dans l'élaboration d'un matériau composite (Baïlon JP. 2000)

Les matériaux composites à matrice organique sont ceux les plus répandus actuellement, l'emploi de composites à matrice métallique ou céramique restant très limité.

Les matrices organiques sont obtenues à partir de polymères thermoplastiques ou thermodurcissables (résines). La résine joue le rôle d'une matrice pour lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontonne (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Tableau 35: les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables (GAY D 1991)

| | TP thermoplastiques | TD thermodurcissables |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| Etat de base | Solide, prêt à l'emploi | Liquide visqueux à polymériser |
| Stockage matière de base | Illimité | Temps réduit |
| Mouillabilité des renforts | Difficile | Aisée |
| Moulage | Chauffage + refroidissement de fixation | Chauffage continu |
| Cycles | Court | Long avec la polymérisation |
| Caractéristiques techniques | | |
| Tenue au choc | Moyen | limitée |
| Tenue thermique | Réduite | Meilleure |
| Chutes et déchets | Recyclables | définitivement perdus |
| Conditions de mise en œuvre | Bonne | Emanations toxiques possibles |

4.6.1.1 Les résines thermodurcissables

4.6.1.1.1 *Polyesters insaturés*

C'est la résine la plus utilisée dans l'application composite de grande distribution.

Une résine de polyester insaturé contenant un monomère (généralement le styrène) est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur. Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

La réaction est exothermique et la température de la résine augmente progressivement depuis le gel jusqu'à un maximum pour redescendre ensuite lentement à la température ambiante.

Le durcissement sera d'autant plus rapide ou, si l'on préfère, le temps nécessaire dans le moule sera d'autant plus court que la courbe de température en fonction du temps se rapprochera davantage de la verticale.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

Il existe différents types de résines :

- Orthophtalique : la plus courante ;
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité ;
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité ;
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques.

4.6.1.1.2 Vinylesters

On peut la considérer comme une variante des polyesters produite à partir d'acides acryliques. Elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeure combustible.

4.6.1.1.3 Phénoliques

Elles sont issues de la polycondensation du phénol et du formol et se caractérisent par une bonne tenue au feu, sans fumée. Elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et à mettre en œuvre.

4.6.1.1.4 Epoxydes

Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- du durcissement à chaud ou à froid ;
- de la tenue en température (120-130 °C, ou 180-200 °C).

4.6.1.1.5 Polyuréthanes et polyurées

Dans la fabrication de pièces composites, on utilise surtout des formules élastomériques dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule. Les constituants sont livrés à l'état de prépolymères liquides :

- Polyols + polyisocyanates = polyuréthanes ;
- Polyéthers + polyamines = polyurées.

4.6.1.1.6 Polyimides

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites HP, lorsque l'on cherche une bonne stabilité sous hautes températures (> 250 °C). Elles restent toutefois très onéreuses et difficiles à mettre en œuvre.

4.6.1.1.7 Bismaléimides

Matrices très peu utilisées en Europe, elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et en température, mais restent difficiles à mettre en œuvre.

Tableau 36: les caractéristiques des différentes matrices thermodurcissables (Berreur et al., 2002)

| Matrice TD | Masse volumique (mg.m ⁻³) | Module d'élasticité longitudinal (MPa) | Module de cisaillement (MPa) | Coefficient de Poisson | Contrainte de rupture (traction) MPa | Allongement à rupture % | Coefficient de dilatation thermique C ⁻¹ |
|---------------|---------------------------------------|--|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|
| | Mv | E | G | K | Cr | A | α |
| Epoxyde | 1200 | 4500 | 1600 | 0.4 | 130 | 2 | 11.10 ⁻⁵ |
| Phénolique | 1300 | 3000 | 1100 | 0.4 | 70 | 2.5 | 1.10 ⁻⁵ |
| Polyester | 1200 | 4000 | 1400 | 0.4 | 80 | 2.5 | 8.10 ⁻⁵ |
| Polycarbonate | 1200 | 2400 | | 0.35 | 60 | | 6.10 ⁻⁵ |
| Vinylester | 1150 | 3300 | | | 75 | 4 | 5.10 ⁻⁵ |
| Silicone | 1100 | 2200 | | 0.5 | 35 | | |
| Uréthane | 1100 | 700 à 7000 | | | 30 | 100 | |
| Polyimide | 1400 | 4000 à 19000 | 1100 | 0.35 | 70 | 1 | 8.10 ⁻⁵ |

4.6.1.2 Les résines thermoplastiques

Les polymères utilisés sont essentiellement des thermoplastiques techniques qui présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement à l'aide de fibres courtes leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle.

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100 °C) sont les suivantes :

- Polyamide (PA) : tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : bonne rigidité, bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistance à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : bonne tenue à la fatigue ;
- Polysulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud ;
- Polypropylène (PP) : peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI) ;
- Polyéther-imide (PEI) ;
- Polyéther-sulfone (PES) ;
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Tableau 37: les caractéristiques des différentes matrices thermoplastiques (Berreur et al., 2002)

| Matrice TP | Masse volumique (mg.m ⁻³) | Module d'élasticité longitudinal (MPa) | Module de cisaillement (MPa) | Coefficient de Poisson | Contrainte de rupture (traction) MPa | Allongement à rupture % | Coefficient de dilatation thermique C ⁻¹ |
|------------|---------------------------------------|--|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|
| | Mv | E | G | K | Cr | A | α |
| PP | 900 | 1200 | | 0.4 | 30 | 20 à 400 | 9.10 ⁻⁵ |
| PPS | 1300 | 4000 | | | 65 | 100 | 5.10 ⁻⁵ |
| PA | 1100 | 2000 | | 0.35 | 70 | 200 | 8.10 ⁻⁵ |
| PES | 1350 | 3000 | | 0.35 | 85 | 60 | 6.10 ⁻⁵ |
| PEI | 1150 | 3300 | | | 105 | 60 | 6.10 ⁻⁵ |
| PEEK | 1300 | 4000 | | 0.5 | 90 | 50 | 5.10 ⁻⁵ |

4.6.2 Les charges (additifs des résines)

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé (CARMA 2004; Gay D 1991)

A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de formes variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse.

Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- Compatibilité avec la résine de base ;
- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

4.6.2.1 Les charges organiques

Des matières cellulosiques sont utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes).

Les avantages de ces matières sont leur coût peu élevé et leur faible densité. Elles sont issues principalement des sources suivantes :

- Farines de bois ;
- Farines d'écorces de fruit et de noyaux ;
- Fibres végétales ;
- Pâtes de cellulose ;
- Amidons.

4.6.2.2 Les charges minérales

Commentaire du Groupe de travail à propos des particules nanométriques

Les charges peuvent contenir des particules de taille nanométrique conduisant à la possibilité d'exposition au cours des opérations de production, d'usinage...

4.6.2.2.1 *Craies et carbonates*

- La craie ou blanc de Champagne peut contenir jusqu'à 99 % de calcite, de la silice et d'autres corps minéraux. La taille moyenne de ses particules varie de 1 à 3 µm.
- Le calcaire et le marbre contiennent 80 à 90 % de calcite et des quantités variables d'oxyde de magnésium et de silice. La taille des particules est comprise entre 0,5 µm et 30 µm.
- Le carbonate de calcium-magnésium ($MgCO_3$, $CaCO_3$) est préparé à partir des minerais de dolomite. On l'utilise comme charge et aussi comme retardateur de flamme, ajouté à du trioxyde d'antimoine.
- Le carbonate de calcium précipité est un mélange pratiquement pur à 99% de calcite et d'aragonite, obtenu sous forme de particules très fines (50 nm à 16 µm). Il est surtout utilisé avec le PVC et dans les matières thermodurcissables ainsi que les polyuréthanes en raison de son caractère hydrophobe.

4.6.2.2.2 *Les silices*

La silice (SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules qui peuvent être très fines (100 nm).

Son incorporation dans la résine améliore les propriétés diélectriques, la résistance à la chaleur et à l'humidité des objets moulés (par exemple ceux en polyméthacrylate de méthyle).

On constate également l'augmentation de la température de transition vitreuse, du module d'Young et de la résistance en compression, ainsi que la réduction du gonflement dans les solvants.

4.6.2.2.3 *Les talcs*

Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

Le talc est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur confère une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Notons également que l'introduction de talc facilite l'usinage des produits finis.

4.6.2.2.4 *Les argiles et alumino-silicates*

Ces substances minérales sont en grande partie constituées par de la silice (42 à 70 %) et de l'alumine (14 à 45 %).

Le kaolin contribue à une meilleure résistance chimique et électrique, et diminue l'absorption d'eau. On peut l'ajouter à des taux atteignant 60 % dans les compositions à base d'esters polyvinyliques, mais habituellement les poudres à mouler en contiennent de 20 à 45 %.

Le kaolin calciné est utilisé dans les mélanges pour l'isolation de câbles et dans les isolants.

Mélangé à de l'alumine et de la silice, le kaolin calciné est utilisé pour assurer la résistance aux acides.

Le mica augmente la stabilité dimensionnelle des pièces moulées ; il améliore les propriétés électriques et thermiques, la résistance aux acides et aux bases, et diminue la reprise d'eau.

Comparé aux fibres de verre, il confère une moins bonne résistance aux chocs ; mélangé avec celles-ci, il permet une réduction des coûts.

4.6.2.3 Les oxydes et hydrates métalliques

4.6.2.3.1 *Poudres et microsphères*

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudres fines comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés. Tous permettent de diminuer le prix de revient et d'augmenter la densité de la matière élastique.

L'oxyde de béryllium est utilisé sous forme de microsphères, qui sont des microsphères de densité voisine de $0,003\text{g/cm}^3$ et d'un diamètre de l'ordre de $40\ \mu\text{m}$.

4.6.2.3.2 *Alumine et trihydrate d'aluminium*

On obtient l'alumine (Al_2O_3), anhydre ou hydratée, à partir de la bauxite. Cette charge apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique ; elle diminue le coefficient de dilatation thermique linéique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu.

L'hydrate d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$ est une charge ignifugeante qui, du point de vue du prix, est concurrentielle ; elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion car elle se décompose de façon endothermique (effet de refroidissement) en alumine et en eau, aux températures supérieures à 220°C .

4.6.2.3.3 *Trioxyde d'antimoine*

On chauffe de l'antimoine dans l'air pour obtenir Sb_2O_4 qui donne SbO_3 par fusion et décomposition. Sa densité est de $4,2 \text{ g/cm}^3$ et sa dureté Mohs comprise entre 6 et 7. Il apporte aux résines ignifugation et coloration blanche.

4.6.2.3.4 *Oxyde de béryllium*

Utilisé sous forme de microsphères dans les résines époxydes, il augmente les conductivités électrique et thermique. Ces carbosphères sont aussi utilisées dans les mousses structurales à densité contrôlée, ainsi que pour la fabrication de pièces polyesters ultralégères.

4.6.2.3.5 *Les céramiques*

Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre $0,4$ et $2,4 \text{ g/cm}^3$ et les dimensions de 1 à $3000 \mu\text{m}$. Une microsphère de $70 \mu\text{m}$ comportant un revêtement permettant une meilleure dispersion a été mise au point. Conseillée dans les résines polyesters en combinaison avec $CaCO_3$, elle apporte une réduction de masse de 15 à 25% avec une amélioration des résistances à la compression et au choc.

4.6.2.4 Le verre

4.6.2.4.1 *Poudres de verre*

Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie égale à $13 \mu\text{m}$ est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.

4.6.2.4.2 *Billes de verres creuses*

Les billes de verre creuses, de densité comprise entre $0,1$ et $0,5 \text{ g/cm}^3$, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant. Elles améliorent les résistances à l'eau et au vieillissement du polyméthyl méthacrylate, et diminuent la friabilité des pièces phénoliques.

Les densités de ces microsphères creuses du type borosilicate de sodium et de calcium sont comprises entre $0,38$ et $0,45 \text{ g/cm}^3$; parallèlement, leur résistance à la compression varie de $1,7$ à 31 MPa . Les applications sont nombreuses (bâtiment, automobile et aéronautique).

4.6.2.4.3 *Microsphères de verre*

L'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues soit à partir de BMC (Bulk Molding Compound) ou de SMC (Sheet Molding Compound) destinées en particulier à l'industrie automobile, soit également à partir de résines phénoliques pour l'industrie aéronautique. On utilise par ailleurs ce type de charge, dans le cas du PPO modifié, pour la réalisation des capotages de machines de bureau. Elle permet la réduction du temps de cycle de moulage de 20 à 30% . Il en est de même dans le cas du moulage des mousses structurales en polyuréthanes.

4.6.2.5 Le carbone

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant, pigment, barrière anti-UV et antioxydant.

Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation et celle du PVC. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules. Par contre, la conductivité électrique des matériaux chargés augmente avec le taux de carbone et avec la finesse des particules

4.6.3 Les procédés de mise en œuvre

Ils sont nombreux ! Le plus utilisé reste le moulage par injection. Néanmoins trois étapes essentielles sont nécessaires (Cf figure 39):

- Imprégnation des renforts (filaments continu de verre dans la grande majorité des cas) par le système résineux
- Mise en forme finale à la géométrie de la pièce (moulage)
- Durcissement du système
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le tableau 38 résume les nombreux procédés qui existent pour fabriquer du matériau composite ainsi que les différentes technologies utilisées. (Berreur, 2002).

L'annexe 12 détaille ces technologies, résume leur principe, les illustre à travers des schémas et donne des renseignements sur les matières premières utilisées ainsi que leurs domaines d'application.

Tableau 38: Les différents procédés mis en œuvre lors de la fabrication des matériaux composites

| PROCÉDÉS | TECHNOLOGIES MISES ŒUVRE |
|---|---|
| Les technologies manuelles de transformation | Moulage au contact Moulage par projection simultanée |
| Les technologies dites en moule fermé | Moulage sous vide Moulage par injection basse pression de résine - RTM |
| Les technologies pour grandes séries | Moulage par injection de compound - BMC Moulage par compression de mat preimprégné – SMC |
| Les autres procédés de transformation par moulage | Granulé dit TPR (thermoplastique renforcé) Plaque dite TRE (thermoplastique renforcé estampable) |
| Moulage par pultrusion | L'imprégnation en continu Moulage par centrifugation |
| L'enroulement filamentaire | |
| Les Procédés innovants | La technologie d'injection pour grande série (Large Injection Moulding Technology -LIMT) la technologie RIFT (Resin Infusion Processes), Un procédé RTM au lauro lactam procédé EPM (dilatation thermique des particules thermoplastiques) |

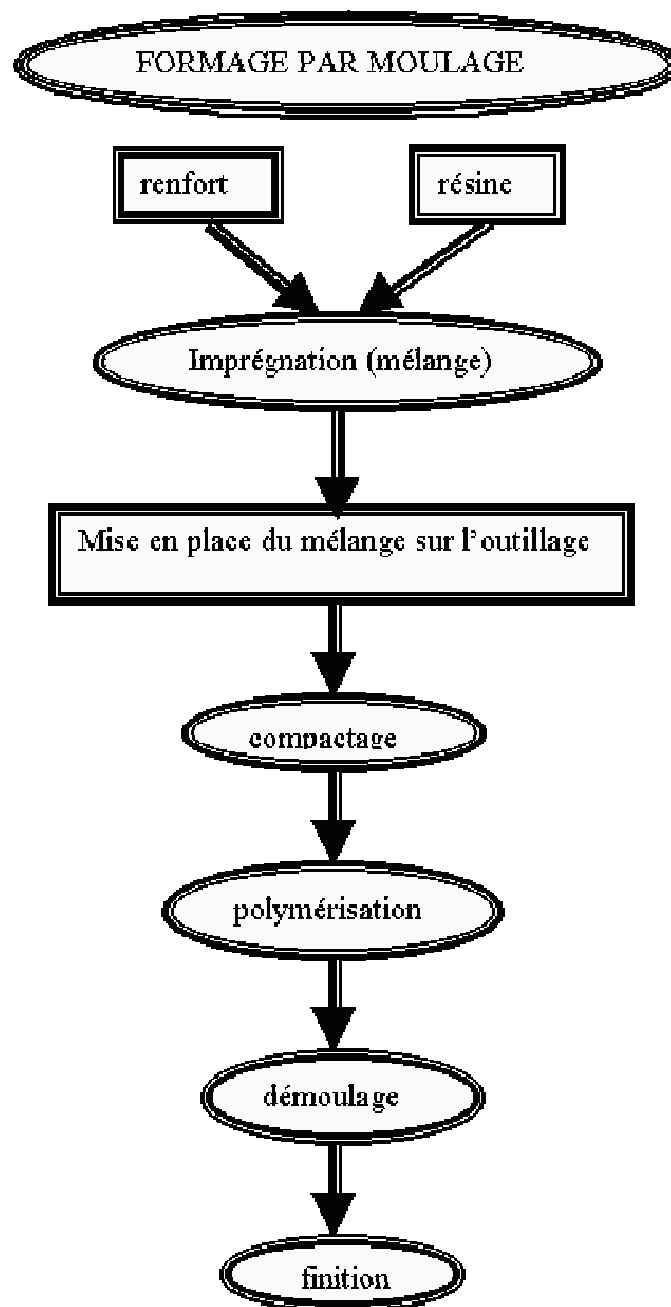


Figure 39: différentes étapes de fabrication d'un matériau composites (Bahlouli N., 2008)

4.6.4 Répartition des procédés de production et de transformation

4.6.4.1 Présentation générale

Trois acteurs occidentaux représentent 75 % du marché mondial de la fibre de verre pour le renforcement. Parmi eux, deux sociétés sont présentes en France : Owens Corning, anciennement Owens Illinois, héritier historique de la technologie et le groupe français St Gobain à travers sa branche renforcement qui est organisée en deux divisions : St Gobain-Vetrotex pour l'activité filature et St Gobain-Technical Fabrics pour les activités de transformation.

Selon les données qui nous ont été communiquées par Owens Corning et Saint Gobain Vetrotex (figure 40), l'évolution de la production mondiale des filaments de verre continus se situe durant les 25 dernières années autour d'une progression annuelle de 5%. Les estimations pour la période 2005-2008 situent cette progression à 6,5% avec plus de 3500 ktonnes de fibres de verre produite pour 2008

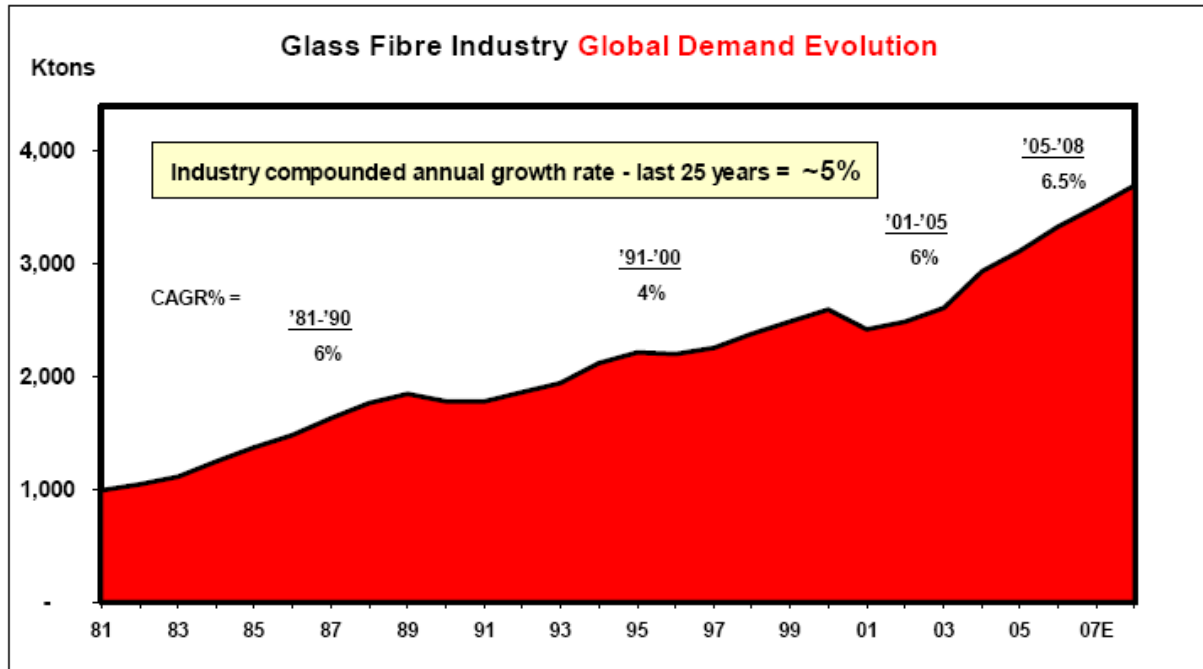


Figure 40: évolution de la production mondiale de la fibre de verre (Owens Corning 2008)

Le tableau 39 fourni par Owens Corning montre l'évolution de l'utilisation de la fibre de verre entre 2005 et 2008 ainsi que le taux de progression du marché et les secteurs d'utilisation de ce matériau. (Maeyaert 2007, Owens Corning 2008)

Tableau 39: taux de progression du marché de la fibre de verre

| PRÉVISION DE VOLUMES (TONNES X 1000) | 2002 | 2005 | TAUX CROISSANCE DE |
|--------------------------------------|------|------|--------------------|
| Transport | 439 | 503 | 5 |
| Toiture | 381 | 415 | 3 |
| Construction | 360 | 392 | 3 |
| electricité | 239 | 307 | 9 |
| Autre | 214 | 227 | 2 |
| Appareils de consommation | 220 | 251 | 5 |
| Energie éolienne | 198 | 226 | 16 |
| Marine | 111 | 145 | 9 |
| Corrosion/canalisation | 46 | 72 | 4 |
| Total | 2208 | 2598 | 5 |

Selon le GPIC, (environ 1 500 industriels sont concernés par la transformation des composites, mais seulement 400 à 450 y consacrent la plus grande partie de leur activité. En effet, de nombreuses PME/PMI qui réalisent des pièces par injection, ne consacrent qu'une faible partie de leur activité à la transformation des composites.

L'étude diligentée en 2002 par la DIGITIP intitulée « L'Industrie Française des Matériaux Composites – Des enjeux prioritaires pour un développement durable » établit un bilan du marché et de ses caractéristiques aux plans national et européen. Selon cette étude, l'Europe représente un petit tiers de la production mondiale de composites soit de 1,6 à 2, Mt, dont environ 55% à base de thermodurcissables (TD). La France représente environ 16 % de la production européenne soit 270 à 300 ktonnes avec plusieurs centaines d'entreprises de toutes tailles. Il faut noter qu'en France, la part des TD est d'environ 75%, ce qui est nettement supérieur à la moyenne européenne. La région Rhône-Alpes qui représente 25 % des tonnages en thermodurcissables transformé, est un pôle majeur avec plus d'une centaine d'entreprises liées au secteur.

On constate de fortes disparités géographiques concernant l'utilisation des procédés de transformation. Par exemple, la compression SMC/BMC est la technologie la plus couramment utilisée par l'industrie française de transformation des matériaux composites (35%), suivie par l'injection des TPR (25%) ; par comparaison, en Europe, c'est l'injection TPR qui prédomine (37%), et, loin derrière, le moulage par contact et projection (18%). Aux USA, c'est ce dernier procédé qui est encore, de loin, le principal procédé de transformation avec 45% des produits transformés. Toutefois, ces distinctions doivent être modulées par l'importance des tonnages effectivement transformés dans chacune des zones concernées.

L'ensemble de ces informations, en tonnage (milliers de tonnes et en pourcentage) est indiqué dans les figures qui suivent (fig 41-45).

En annexe, un document fourni par Owens corning et Saint Gobain Vetrotex indique la chaîne de production complexe et hétérogène de l'industrie des composites ainsi que la valeur en euros de chaque étape (annexe 13).

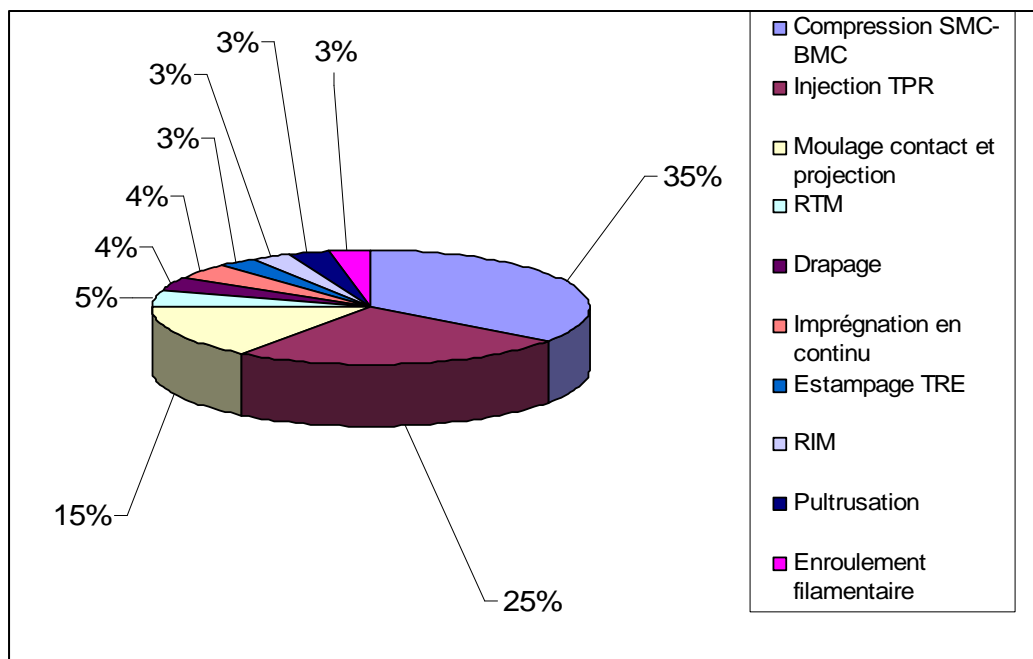


Figure 41: variation du marché français des composites (GPIC, 2008)

Des tableaux complémentaires sont mis en annexe 2.

Suivant les applications et les produits, le taux pondéral de renfort verre peut varier entre 15 et 75 %. Les secteurs dans lesquels les matériaux renforcés verre-résine trouvent des applications sont très étendus, ce sont, par ordre d'utilisation décroissante :

- le bâtiment et les infrastructures : évier, toiles à peindre, éclairage, ponts ;
- le transport : carrosserie, pare-chocs, tableaux de bord ;
- l'électricité : armoires de distribution, chemins de câbles et l'électronique, circuits imprimés ;
- la plaisance et le loisir : bateaux, piscines ;
- l'équipement industriel : tuyaux, réservoirs, pâles d'éoliennes ;
- les biens de consommations : capotage d'appareils électroménagers, stylos, etc...

Comme le montre les figures 42 et 43 les trois premiers secteurs cumulent près de 70 % des ventes.

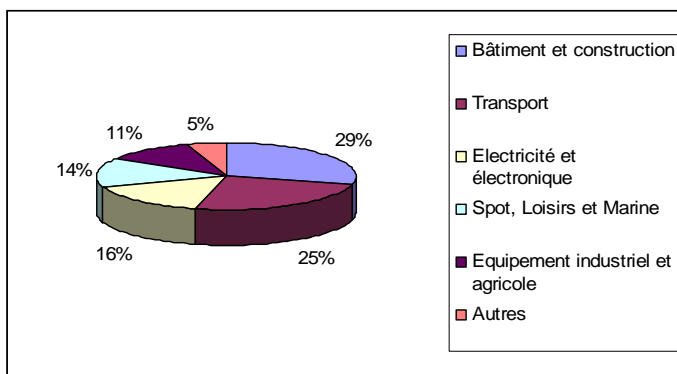


Figure 42: marché mondial de la fibre de verre de renforcement (Saint-Gobain VetrotexInternational S.A 2001)

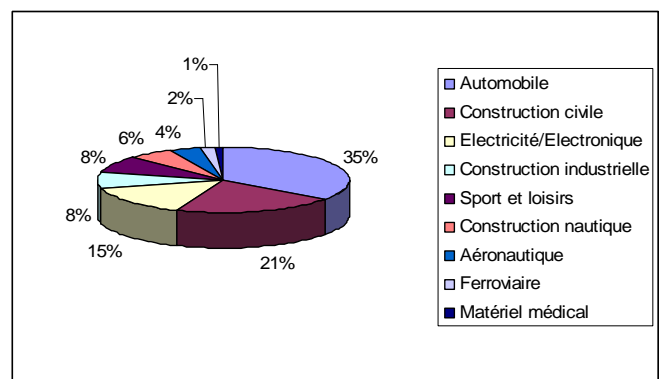


Figure 43: ventilation du marché français des composites (GPIC 2008)

4.6.4.2 La situation mondiale

En 2006, la croissance mondiale des matériaux composites a atteint 7,2%. Pour 2007, les prévisions s'élèvent à 5,3%.

Selon C. Dana, président de la division composites solutions Owens Corning, la croissance en renforcements en Amérique du Nord devrait ralentir de 1,5 à 2% dans l'ensemble soit entre 4 et 5% (JEC Composites 2007) si l'on exclut les fils de verre coupés pour l'utilisation en condition humide qui servent principalement pour les mats de toiture en Amérique du Nord. En Europe, la croissance devrait être beaucoup plus forte et atteindre 5,9% alors que l'Amérique latine et l'Asie pacifique occuperont le haut du tableau avec des taux de croissance respectifs de 7 et 9,7%. Cependant, même si ce dernier chiffre paraît élevé, il constitue pour l'Asie pacifique le premier taux à un seul chiffre depuis plusieurs années, puisqu'en 2006 cette région a connu un taux de croissance de 11%.

Cette croissance viendra s'ajouter à une base déjà importante estimée entre 3 et 3,3 millions de tonnes en 2006.

D'après les statistiques fournies par Saint Gobain et Owen Corning, le marché mondial des renforts verre a été estimé à environ 2,2 millions de tonnes en 2002. Ces chiffres, ainsi que ceux qui suivent, n'incluent ni les voiles de verre ni le verre AR (alcali-résistant). Entre 1996 et 2002, ce marché a progressé en moyenne de 4,2% par an, pratiquement deux fois le taux moyen de progression des PIB des pays industrialisés.

Remarque : Ces statistiques ne comprennent ni les procédés voie humide qui utilisent en général des fils coupés, ni les procédés utilisant les voiles de verre.

Les principaux marchés des renforts verre sont l'Amérique du Nord (33%), l'Europe (32%) et l'Asie (30%). L'Asie se développe rapidement car, dans certains pays comme l'Inde, la Corée et la Chine, ont été installées de nouvelles usines de fabrication de renforts ou parce que ces pays deviennent des localisations appréciées pour de grands groupes fabriquant des pièces plastiques renforcées et des équipements électroniques ou de communication (Thaïlande, Indonésie, Malaisie).

L'automobile constitue le principal marché final au Japon (25% de l'utilisation totale des matériaux composites), le bâtiment est le plus gros utilisateur de matériaux composites en Chine et en Corée (24% et 37% respectivement) et ce sont les infrastructures pour l'Inde.

Dans cette région, une multitude de procédés sont utilisés, le compound thermoplastique arrivant nettement en tête avec 32%. Viennent ensuite le moulage au contact avec 16% du marché, l'enroulement filamentaire 6%, la pultrusion, les préimprégnés et autres 9% et enfin les autres 6%.

Les chiffres relatifs aux procédés utilisés dans la région cachent d'importantes variations d'un pays à l'autre. Par exemple, les principaux procédés utilisés en Chine sont le compound thermoplastiques et l'enroulement filamentaire (24% et 20% respectivement).

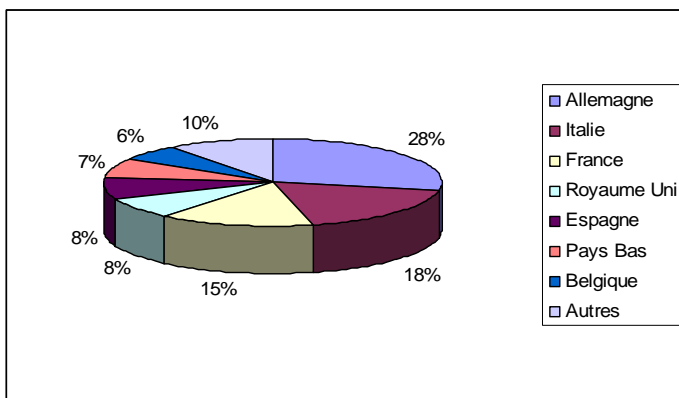


Figure 44: le marché européen des composites (GPIC, 2008)

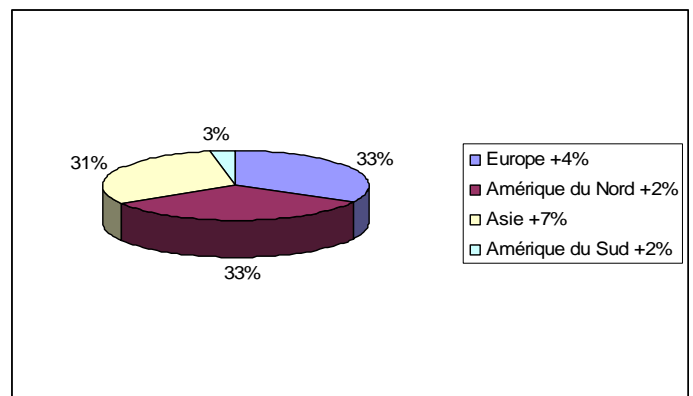


Figure 45: le marché des renforts verre par zone géographique (en volume) (Saint Gobain et Owen Corning, 2008)

L'une des motivations majeures avancées pour adopter les composites concerne l'allègement, que ce soit pour le transport terrestre ou pour le transport aérien. Or, l'allègement passe aussi par une conception plus fine qui peut être atteinte avec des matériaux moins légers mais mieux connus, l'aluminium en particulier. La question de la sécurité peut également jouer en défaveur des composites. En effet, faute de pouvoir prédire à 20 ans quel sera le vieillissement d'une structure composite, il convient d'appliquer des coefficients de sécurité que l'on peut aussi bien appeler des "coefficients d'ignorance". Les composites se trouvent ainsi concurrencés par des matériaux pour lesquels on dispose de bases de données alimentées par des années et des années d'expérience (Cinquin J, 2002)

4.6.4.3 La situation en France

En France, l'industrie des composites est dominée par d'important transformateurs sur les procédés les plus industrialisés, puisqu'il existe environ 300 sites principaux. Toutefois, la plus grosse part du tissu de la production est réalisée dans de petites entreprises utilisant

des technologies en moule ouvert (moulage contact et projection, soit environ 20% du tonnage transformé).

Il existe environ 500 entreprises de transformation des matériaux composites, l'effectif global étant de 20 000 personnes, et réparti comme suit.

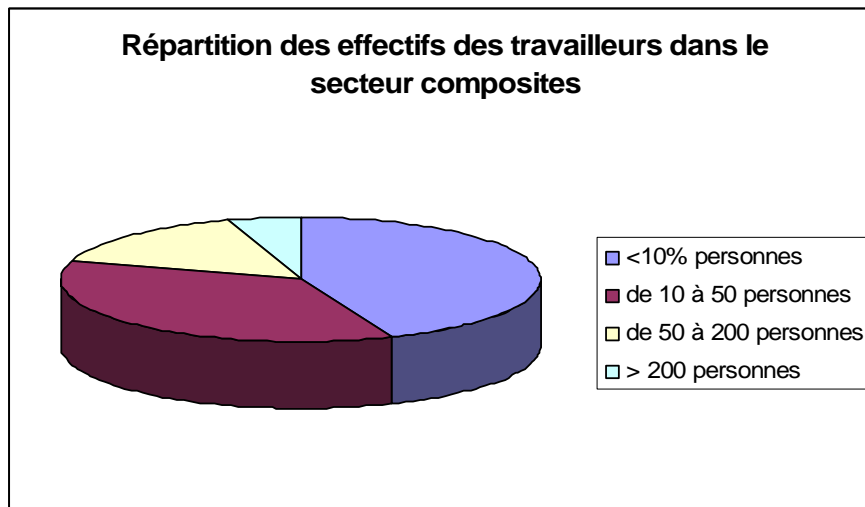


Figure 46: répartition des effectifs des travailleurs français dans le secteur composites (Ademe 2004)

4.7 La place des filaments de verre continus dans les textiles techniques

Une même référence fabriquée à partir d'éléments en filaments de verre continus peut être utilisée par des enducteurs de tissus pour composites, des fabricants de vêtements de protection ou de rideaux anti-feu ou encore de filtres (Saint-Gobain Vetrotex International S.A. 2008).

Nombre de ces produits ont une destinée plurielle. Six grands domaines d'activité industriels, utilisateurs de tissus enduits, ont été ciblés :

- les renforts pour composites plastiques,
- les laminés pour appareillages électriques et électroniques,
- les tissus enduits et plastifiés,
- l'isolation thermique et acoustique ainsi que la protection anti-feu,
- les structures architecturales et matériaux de construction,
- les vecteurs de filtration haute température.

Sa valeur, estimée à 275 millions de dollars pour l'Amérique du Nord et 150 pour l'Europe, devrait croître de 5% par an pendant les cinq prochaines années. Les applications sont hétérogènes et les besoins très spécifiques. Par exemple les vêtements protecteurs pour poste de soudure sont commercialisés par un réseau spécialisé et souvent jetés après quelques utilisations, ils nécessitent un tissu à fort grammage enduit de silicone, puis cousu dans de petits ateliers. A l'opposé, avec un chiffre d'affaires équivalent, le marché des structures architecturales demande des tissus très légers dotés d'une forte technicité et qui durent au moins vingt ans.

Un peu plus de 10% du volume des textiles techniques produits dans le monde sont destinés aux marchés du bâtiment et du génie civil, ce qui représente quelques 2 millions de tonnes.

Leur intégration dans ce secteur est forte, et ils sont considérés aujourd'hui comme un cinquième matériau de construction, grâce notamment à des propriétés mécaniques importantes. On les appelle également des matériaux composites souples (tissus enduits et/ou fibres).

Cependant, dans ce secteur, les fibres rencontrées sont d'abord organiques (principalement en polyesters), parfois minérales (fibres de verre), rarement naturelles. La part de chacune de ces fibres n'a pas pu être déterminée ni les tonnages utilisés en France ou au niveau Européen. Les structures architecturales tendues représentent un marché de 200.000t/an en Europe, composé à 95% de polyester / PVC et à 5% de fibres de verre enduites de téflon soit 10.000 t/an de fibres de verre dédiées à cette utilisation en Europe.

Les tissus et/ou les fibres sont souvent enduits ou imprégnés, au point que pour certains industriels, on peut considérer qu'aujourd'hui, le dépôt de polymères sur un support textile constitue leur cœur de métier (exemple pour les structures en filaments continus de verre : rubans tissés en de verre imprégnées de résines époxy, tissus de verre enduits de polymères fluorés (téflon notamment).

Une autre particularité du secteur, l'utilisation de non tissé à base de fibres de verre : voiles de verre, mat,...- dont la cohésion est assurée par des jets d'eau à très haute pression (procédé spunlace) et non par aiguilletage mécanique.

Enfin, compte tenu des règles de sécurité en vigueur dans les constructions, la plupart des produits finis doivent satisfaire à un classement de réaction au feu MO, M1 ou M2.

Les matériaux textiles sont ici appréciés pour leurs propriétés mécaniques alliées à une certaine souplesse, légèreté, durabilité et résistance aux intempéries. Certains ont également des qualités de protection solaire, électromagnétiques, électrostatique ou la capacité à remplacer des matériaux prohibés comme l'amiante.

On peut tenter de les classer en 3 grandes familles : les membranes, les produits de renfort, et les tissus d'ameublement " nouvelle génération " (Caramaro L. 2006, Stauder F 2004)

4.7.1 Les membranes

Ce sont surtout les produits d'architecture textile, dérivés des bâches pour camions. Ici les tissus sont généralement enduits de téflon pour les textiles en fibres de verre.

Les fibres peuvent également être imprégnées de résines thermodurcissables pour assurer une meilleure protection aux intempéries, aux U.V. ou à l'abrasion. Elles trouvent leur utilisation dans les applications ci-dessous

- structures tendues ou portées, pouvant atteindre 30.000 m² par exemple, en couvertures de stades ou de gares TGV, pour villages V.I.P... ;
- façades textiles pour bâtiments dont la façade est en réfection ;
- affiches ou enseignes lumineuses, pouvant atteindre 50 m de long, et décorées par sérigraphie, impression numérique par jet d'encre ou par adhésif en vinyle ;
- écrans solaires (intérieurs ou extérieurs).

4.7.2 Les produits d'intérieur

Les tissus d'ameublement, dits traditionnels, deviennent de plus en plus techniques pour gagner en fonctionnalité, comme on peut le voir avec les stores, les moquettes ou la toile de verre murale.

- stores : occultants en fibres de verre enrobées de PVC,
- écrans solaires et moustiquaires (intérieurs ou extérieurs) en fibre de verre ;

- moquettes antistatiques à base de fibres de verre modifiées au carbone, mélangées à des fibres métalliques, ou bien encore imprégnées de sulfates métalliques ou cuivreux javellisables avec teinture par adjonction de pigments colorants.

Depuis son introduction il y a une trentaine d'années en Suède, puis sur les autres marchés européens, la toile de verre murale, constituée de filaments de verre continu, n'a cessé de gagner du terrain face au papier peint et aux autres revêtements muraux (textiles, vinyles...). Le tissu de verre possède des propriétés techniques plébiscitées dans les sites des producteurs parmi lesquelles on peut citer des qualités antimoisissures, antiacariens, antibactériennes et ininflammables avec une résistance accrue au feu.

Cette toile est constituée d'un tissage de filaments continus de verre, enduits de résines, elle peut s'appliquer à des supports divers (béton, plaques de plâtre, aggloméré, bois...). Elle est destinée à être collée sur les murs, cloisons, plafonds, portes, etc.

Les toiles de verre sont produites à raison de 22 millions de m² chaque année, soit 12 % d'un marché européen en forte croissance, estimé en 2004 à 180 millions m² (dont 50 millions m² en France).

4.7.3 Le marché

Selon une étude de David Rigby Associates, le bâtiment et le génie civil, bien que fortement cycliques et saisonniers, représentent l'un des secteurs où la progression des textiles techniques sera la plus forte entre 2005 et 2010 : +5%/an au niveau mondial (David Rigby Associates 2004).

Les produits de renforts pour béton, les tissus techniques d'intérieur, ainsi que les structures architecturales devraient largement favoriser cette croissance.

Les produits de renforts à base de fibres de verre constituent une niche de 2,6 millions de tonnes (moins de 3% du tonnage verrier mondial en 2002 selon Freedonia), soit tout de même 6 milliards €. Cette niche est détenue à 75% par 6 principaux acteurs mondiaux (Freedonia 2007) :

- Knauf (DE) ;
- Alcopor (CH) ;
- St Gobain (FR) ;
- Owens Corning (USA) ;
- PPG (USA) ;
- Johns Manville (USA).

Concernant la production française, celle-ci est passée de 50ktonnes à 70ktonnes en 2006, suite à des investissements de Owens Corning Fiberglas. Enfin il est difficile là aussi d'ignorer l'Asie, et surtout la Chine, dont les capacités de production devraient croître de 50% d'ici 2010 pour se situer autour de 500ktonnes.

4.8 Les chiffres de la douane

Les chiffres cités ci-dessous sont issus d'un site officiel mis en place par la commission européenne : http://exporthelp.europa.eu/index_fr.html

L'Export Helpdesk est un service en ligne mis en place pour faciliter l'accès des pays en développement aux marchés de l'Union Européenne.

Ce service gratuit, a pour but de fournir des informations aux exportateurs des pays en développement intéressés à approvisionner le marché de l'UE.

La section « statistiques commerciales » fournit des données (exportations et importations) pour l'Union européenne et chacun de ses Etats membres.

Une liste des marchandises à travers un code de description permet de situer les filaments de verre continus.

L'addition de l'ensemble des quantités de ces marchandises importées vers la France ou exportée permet d'arriver à une vision globale des flux de filaments de verre continus dans le territoire national.

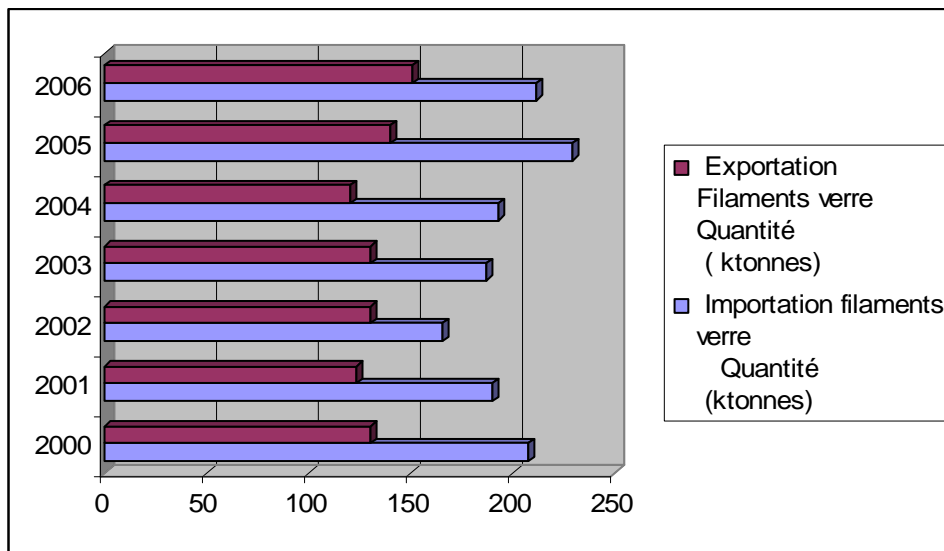


Figure 47: chiffres globaux des importations et exportations françaises des filaments de verre (Export Helpdesk)

L'analyse de la figure 47 montre que de manière régulière au cours du temps, la France importe plus de fibres en filaments de verre continus qu'elle en exporte. Les quantités, alors qu'elles avaient subi peu de variations entre 2000 et 2004, semblent avoir progressé après cette date en passant en importation de 193ktonnes environ en 2004 à 212 ktonnes en 2006 et en exportation de 120kT en 2004 à 151 ktonnes en 2006. Ces chiffres donnent une idée du marché français des filaments de verre continus mais ne nous permettent pas de connaître la quantité de fibres restées en France.

4.9 La gestion des déchets

4.9.1 Déchets des matériaux composites

Les déchets de fils de verre soumis à des tests d'éluion ne donnent pas lieu à l'émission de produits dangereux en quantité significative. Ils peuvent donc être considérés comme des Déchets Industriels Inertes ou Déchets Industriels Banals selon les réglementations nationales ou locales (ARAMM, 2005).

Le positionnement des filières thermoplastique (TP) et thermodurcissable (TD) est très différent. Dans la filière TP, les rebuts de production sont réutilisables et en grande partie réutilisés par le transformateur au pied des machines d'injection. Le seul problème qui se pose est celui des pièces rebutées comportant des inserts métalliques. Dans la filière TD, les rebuts de production sont, par essence non réutilisables de façon simple dans le cycle de production même. C'est donc ce secteur qui pose problème et exprime un besoin de voir émerger de solutions de recyclage/revalorisation.

4.9.1.1 La situation actuelle

Plus de 90 % des déchets de production en composites thermodurcissables sont actuellement mis en décharge. La France représente environ 16 % de la production européenne soit 270 à 300 kT, avec plusieurs centaines d'entreprises de toutes tailles, sur deux pôles principaux : le « croissant » Nord / Normandie / Centre / Pays de la Loire (près de 40%) et la région Rhône-Alpes (25% des tonnages transformés). Le pôle Sud-Ouest est surtout dédié aux composites techniques pour l'aéronautique (renfort carbone ou aramide et forte valeur ajoutée).

La situation des matériaux composites vis-à-vis des contraintes de recyclage et de revalorisation est contrastée. La répartition des déchets composites de production en France est décrite dans la figure 48.

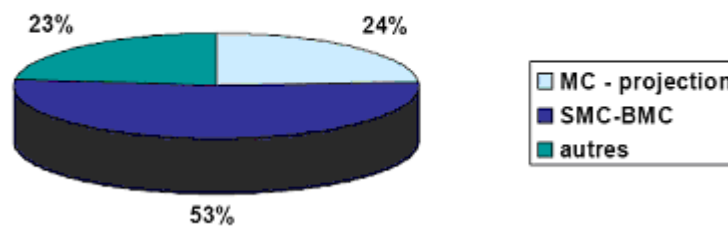


Figure 48: Répartition des déchets composites de production en France (ARAMM, 2005)

4.9.1.2 L'étude Rhône Alpes

Une étude en Rhône Alpes a été réalisée sur les procédés de valorisation des déchets composites à matrice thermodurcissable en 2001. Cette première étude intitulée « *La valorisation des matériaux composites en fin de vie : enjeux techniques et économiques* ». nous été fournie par l'agence Rhône Alpes pour la maîtrise des matériaux. La région Rhône-Alpes qui représente 25 % des tonnages en thermodurcissables transformé, est un pôle majeur avec plus d'une centaine d'entreprises liées au secteur. (ARAMM 2003; 2005).

Lors de cette étude, plusieurs entreprises de la filière composites ont été visitées. Les déchets de production de composites thermodurcissables recensés en Rhône-Alpes étaient de 5400 tonnes/an alors qu'ils étaient estimés à 6000- 7000 tonnes/an.

Les principaux enseignements tirés sont les suivants:

- une méconnaissance de la nature et de la quantité des déchets composites par les entreprises ;
- Les déchets composites ne sont pas triés et le tri est parfois non envisageable (coût élevé, formation des opérateurs inexistante, etc.) ;
- une problématique liée au transport : les déchets sont encombrants avec une faible densité – une optimisation par compactage est nécessaire ;
- Le traitement se fait essentiellement par enfouissement en CET plus de 90 % des déchets de production en composites thermodurcissables sont mis en décharge, avec un coût en forte augmentation et la menace d'une interdiction totale pour les déchets considérés comme non « ultimes ». La composition des déchets composites thermodurcissables est décrite dans la figure 49.

D'une manière générale, on observe une saturation des CET et une augmentation du coût d'enfouissement. Pour certains sites, le prix a augmenté d'environ 30 % durant les deux dernières années et se situe en moyenne autour de 90€ la tonne.

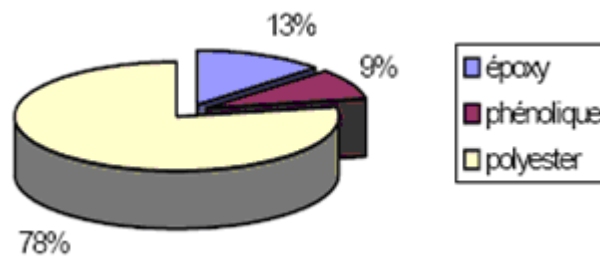


Figure 49 : composition des déchets composites thermodurcissable (ARAMM, 2005)

A la demande des industriels de la filière composites, l'Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux a lancé, fin 2002, le projet RECYCOMP, en étroite collaboration avec le GPIC et la Fédération de la plasturgie au plan national et avec la participation de l'ENSAM et de COMPOSITEC au plan local. La première phase de ce projet, comportant une étude des flux de déchets de production et des voies de valorisation, s'est achevée fin 2003. Cette étude nous a également été fournie par l'ARAMM.

Le projet RECYCOMP II a pour objectif de vérifier la faisabilité technique et économique des différentes solutions de valorisation et de permettre aux industriels de la filière composites de trouver des alternatives à la mise en décharge de leurs déchets.

Les essais ont été effectués essentiellement avec des déchets en polyester renforcés par des fibres de verre qui sont représentatifs de la majorité des déchets de production de la région Rhône-Alpes.

La problématique des déchets en fin de vie (type DEEE ou VHU) a également été abordée. La proportion des composites thermodurcissables dans les DEEE et leur traitement actuel ont été analysés. Les principaux éléments d'information apportés par cette étude pour améliorer la prise en charge des déchets composites sont résumés ci-dessous.

Environ 140 entreprises ayant une activité dans les composites thermodurcissables ont été identifiées sur la région Rhône-Alpes. Une soixantaine d'entreprises a participé à l'étude. De nombreux secteurs d'activité sont représentés : transports, électrotechnique, sports et loisirs, aéronautique, BTP, génie chimique, protection individuelle, environnement... Les composites thermodurcissables sont utilisés dans la fabrication d'une grande diversité de produits : pièces de carrosserie, boîtiers électriques, cuves, conteneurs, embases, moules, skis, bateaux...

4.9.1.3 Typologie des entreprises oeuvrant dans le matériau composite

Les entreprises diagnostiquées sont en majorité de petite taille avec un effectif inférieur à 30 personnes. Une douzaine d'entreprises compte plus de 100 salariés avec quelques sociétés de grande ampleur (Cf figure 50).

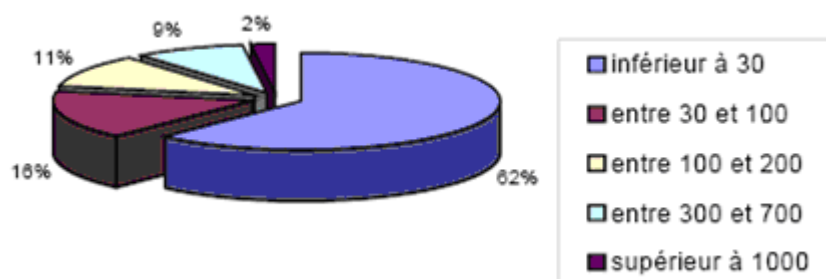


Figure 50 : effectifs des entreprises oeuvrant dans le matériau composite (ARAMM, 2005)

Ces entreprises utilisent différents procédés de mise en œuvre : RTM (Resin Transfert Molding), moulage au contact (MC), projection, injection BMC, compression SMC, imprégnation en continu. Le moulage au contact est le procédé le plus largement utilisé. Il est présent dans presque la moitié des entreprises diagnostiquées.

4.9.1.4 Analyse des déchets de production

Le tonnage total des déchets de production en composites thermodurcissables, comptabilisé en Rhône-Alpes, s'élève à 5400 tonnes. Ce sont principalement de petits gisements de moins de 10 tonnes/an. 55% des entreprises ont des gisements compris entre 10 et 50 tonnes (25%) et certains de plus de 100 tonnes/an (18%) (Cf. figure 51).

On peut estimer que le tonnage réel (y compris les gisements non recensés) se situe probablement entre 6000 et 7000 tonnes/an en Rhone Alpes.

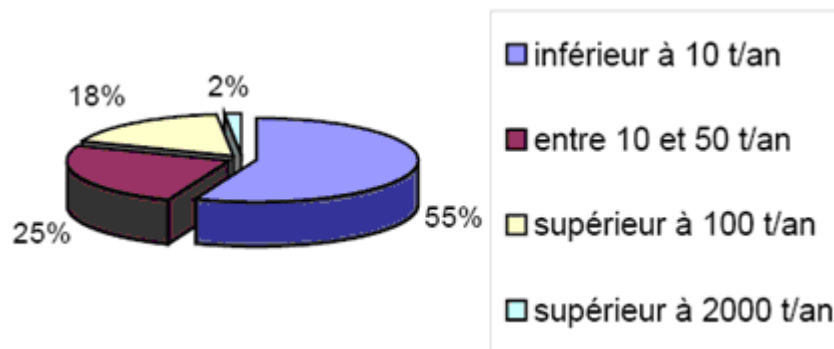


Figure 51: analyse des gisements de déchets de matériaux composites (ARAMM, 2005)

A l'issue de ce rapport des solutions et recommandations ont été formulées parmi lesquelles on peut retrouver :

- le tri des déchets : les déchets en matériaux composites doivent être plus ou moins propres et séparés des autres matériaux auxquels ils pourraient être associés. La mise à disposition d'un conteneur réservé aux déchets composites et la formation du personnel à la gestion des déchets pourraient être utiles.
- Le démontage : pour les produits fin de vie, un démontage plus ou moins poussé des pièces composites est nécessaire. Le démontage devra être pris en compte par les fabricants dès la conception des produits afin de faciliter la séparation des pièces en composite et leur valorisation ultérieure.
- Le ramassage collectif des déchets composites la présence d'un grand nombre de petites entreprises générant de faibles quantités de déchets incite à envisager des solutions de ramassage collectives pour diminuer le coût.
- Des solutions de recyclage et valorisation des déchets composites thermodurcissables à base de fibres de verre ont été étudiées, elles ont montré les limites du recyclage stricto sensu de ces matériaux, c'est à dire leur réutilisation dans la même filière d'application. Dans le meilleur des cas, la réincorporation des recyclats dans les matières nobles excède rarement 5 à 10 %. D'autres filières de revalorisation, ont été explorées dans la deuxième phase du projet Recycomp s'inscrivant dans des objectifs de développement durable avec, en particulier, l'absence de résidus secondaires.

Les filières de valorisation identifiées sont les suivantes :

- La valorisation énergétique ;

- L'incinération en UIOM (Unité d'incinération des ordures ménagères) ;
- L'incinération industrielle ;
- La co-incinération en cimenterie ;
- La valorisation matière par broyage ;
- La pyrolyse haute température ;
- La thermolyse ;
- La pyrolyse en bain de sels fondus ;
- La dépolymérisation chimique.

4.9.2 Le Traitement des véhicules hors usage (VHU)

L'industrie automobile utilise les matériaux composites thermodurcissables pour la réalisation de différentes pièces telles que des pare-chocs, certaines pièces de carrosserie, les supports de toits ouvrants... Un accord-cadre a été signé le 10 mars 1993 avec les différents acteurs de la filière afin de limiter progressivement le poids de déchets ultimes issus du traitement des VHU. La directive européenne VHU du 21 octobre 2000 prévoit la réutilisation et la valorisation des différents composants.

4.9.3 Traitement des déchets électrotechniques

Les matériaux composites thermodurcissables sont également présents dans les équipements électroniques : coffrets électriques, circuits imprimés, capotages, chemins de câbles... Chaque année, environ 1,7 millions de tonnes de DEEE sont générées par les entreprises et les ménages. Ces déchets ont un taux de croissance élevé : de 3 à 5% par an. Mais le taux de matériaux composites et encore moins de filaments continus de verre au sein de cette catégorie n'a pas pu être déterminé.

4.10 Les autres fibres utilisées en tant que renfort

Le renfort d'un matériau composite étant de nature filamenteuse, plusieurs fibres autres que le filament continu de verre peuvent jouer ce rôle. On en distingue principalement deux catégories : les fibres synthétiques et les fibres naturelles.

4.10.1 Les fibres de synthèse

4.10.1.1 La fibre de carbone

La fibre de carbone fait référence à un fil de carbone ou à un tissu réalisé grâce à ce fil. Le matériau de base obtenu sous forme de fil est léger et très solide.

Les fibres de carbone sont des fibres synthétiques organiques. Elles sont produites à haute température (1200°C) par un procédé de carbonisation. Le diamètre des fibres de carbone varie de 5 à 15 microns (7 à 8 microns en moyenne) (Petit-Moussaly S et al. 2002).

Les fibres de carbone sont caractérisées par leur faible densité, leur résistance élevée à la traction et à la compression, leur flexibilité, leurs bonnes conductibilités électrique et thermique, leur tenue en température et leur inertie chimique (sauf à l'oxydation). Elles résistent à la corrosion et à l'usure. Elles sont faciles à usiner et sont perméables aux rayons X.

Leurs limites d'utilisation sont les suivantes :

- sensibilité aux chocs (rigidité élevée et faible allongement à la rupture) ;

- attaque à chaud (température supérieure à 400°C) par l'oxygène de l'air et les acides oxydants ;
- corrosion de type galvanique au contact des métaux et alliages.

La production mondiale est en augmentation (principaux producteurs : États-Unis, Japon et Royaume-Uni); leur domaine d'application qui concernait essentiellement l'industrie aéronautique et spatiale initialement, est en pleine expansion et s'étend désormais à des secteurs variés tels l'industrie automobile, les loisirs (raquette de tennis, canne à pêche, planches à voile, ...).

La matière première qui vaut de l'ordre de 2 Euros/Kg donne naissance à des produits qui valent alors de 200 à 1000 Euros/kg. Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. La figure 52 indique les principaux procédés de transformation de la fibre de carbone.

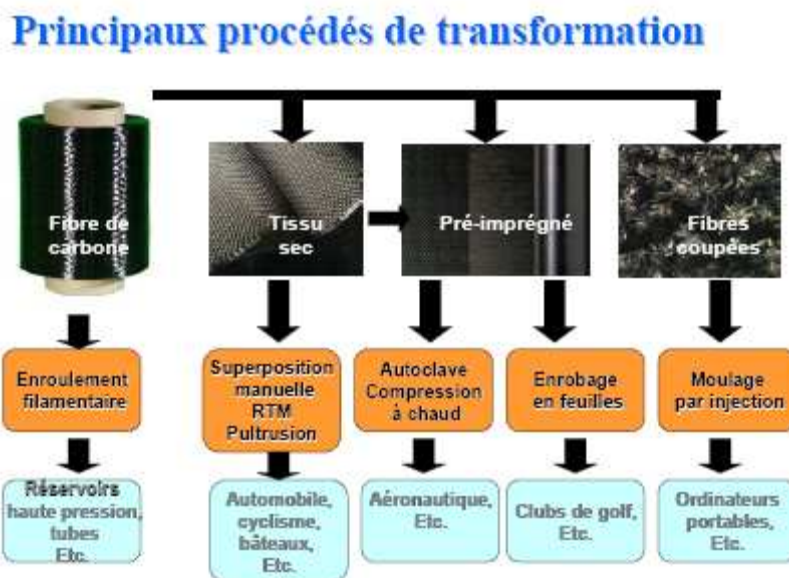


Figure 52: principaux procédés de transformation de la fibre de carbone (Brisson, 2006)

4.10.1.1.1 Le marché et les applications

Le marché qui était de seulement 50 tonnes en 1975 est estimé à 60 000 tonnes en 2015. De 1975 à 1995, la principale utilisation des fibres de carbone était surtout les équipements sportifs tels que cannes à pêche, raquettes de tennis et clubs de golf. Les utilisations dans l'aéronautique ont véritablement débuté vers 1985 avec la fabrication de pièces primaires (caisson ATR A 72 en 1987) et c'est vers 1995 que les utilisations industrielles dans des domaines variés (construction navale, génie civil, automobile...) ont vraiment pris leur essor.

En 2005, les 23 000 tonnes utilisées ont concerné :

- les équipements sportifs : 5 000 tonnes ;
- l'aéronautique : 3 000 tonnes ;
- les usages industriels : 15 000 tonnes.

D'ici à 2010, les plus importants développements sont attendus dans des milieux industriels variés (génie civil, automobile, construction navale, éolien, offshore pétrolier...), les besoins en aéronautique continuant à croître alors que les demandes en matériels sportifs devraient peu évoluer sauf si des pays tels que la Chine et l'Inde en décident autrement. (Brisson, 2006). La figure 53 montre la croissance du marché des fibres de carbone.

Croissance du marché des Fibres de Carbone

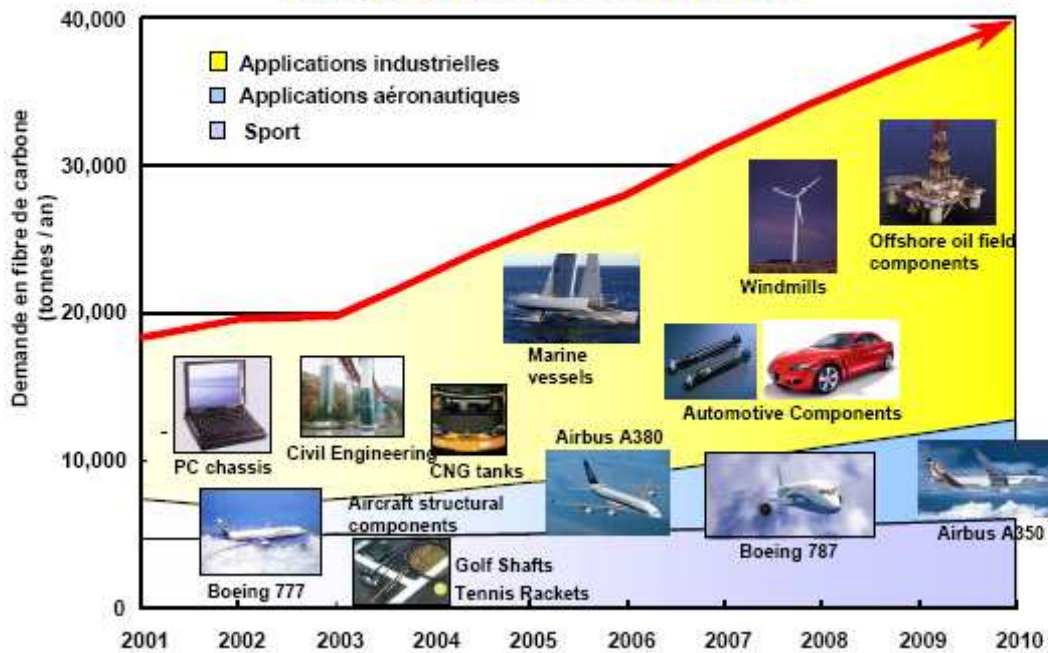


Figure 53: croissance du marché des fibres de carbone (BRISSON 2006)

4.10.1.1.2 Les fabricants mondiaux

En 2005, le groupe TORAY, leader mondial, représentait 34% des parts de marché. Les autres fabricants, essentiellement asiatiques, sont les suivants :

- TORAY Group (Japon) 34 %
- TOHO TENAX Group (Japon) 19 %
- MITSUBISHI RAYON Group (Japon) 16 %
- HEXCEL (USA mais d'origine japonaise) 5 %
- - CYTEC (USA mais d'origine japonaise) 3 %
- TAIWAN Plastics 6 %
- ZOLTEK + FORTAFIL + ALDILA + SGL (Large Tow) 17 %

Large Tow indique des fibres d'assez gros diamètre et moyennement performantes.

4.10.1.2 La fibre d'aramide

Les fibres d'aramide sont des fibres organiques synthétiques, dont la première génération a été développée dans les années 1960. On la nomme souvent « Kevlar », qui est la marque de son créateur, Dupont de Nemours. Elles sont, plus précisément, composées d'une chaîne de polyamide comprenant au moins 85% de groupements amides reliés à deux cycles aromatiques (Roos F, Guimon, and Vincent R 2003).

Les fibres d'aramide sont donc des polyamides aromatiques (le mot « aramide » étant une abréviation de l'expression « aromatic polyamide »).

Les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) mais souffrent :

- d'une adhérence moyenne entre matrice et fibre,
- d'un prix encore trop élevé

En 1998, la consommation européenne était d'environ 9000 tonnes comprenant :

- les produits de friction et d'étanchéité 40%
- Les renforts de caoutchouc 22%
- Les cordes et les câbles 18%
- La protection balistique 16%
- Les matériaux composites 4%.

La figure 54 indique la répartition de l'utilisation de la fibre d'Aramide en France

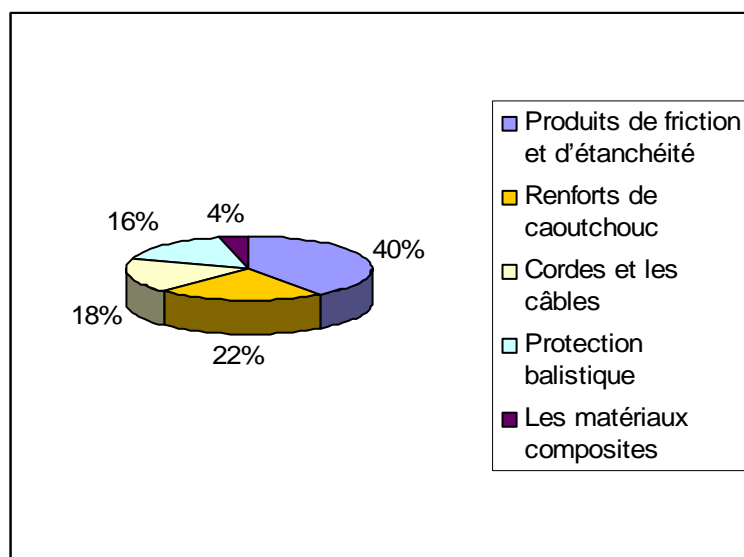


Figure 544: répartition de l'utilisation de la fibre d'Aramide en France (Roos, 2003)

Les fibres de méta-aramide sont essentiellement utilisées pour leurs performances thermiques et chimiques sans l'industrie textile et notamment pour les textiles à usage technique : vêtements de protection contre la chaleur et le feu, filtres, textiles pour isolation des moteurs et transformateurs.

4.10.2 Les fibres naturelles

4.10.2.1 Présentations des différentes fibres d'origine naturelles

(Cf figure 55)

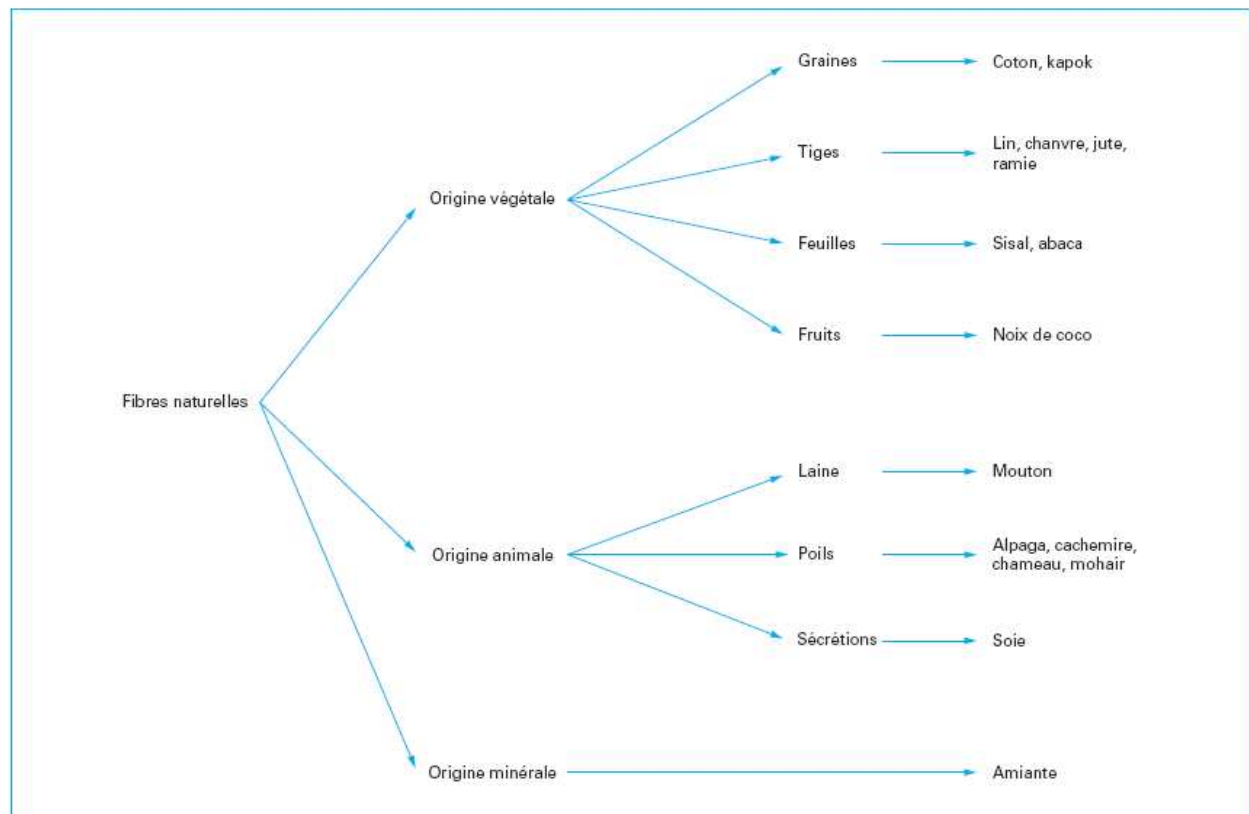


Figure 55: les différents types de fibres d'origine naturelle (Balay C 2005)

Les composites renforcés par des fibres naturelles sont encore peu utilisés et en cours de développement. Pour le développement à grande échelle, les efforts portent actuellement sur :

- la mise en place de filière de production et de distribution pour répondre aux besoins de l'industrie ;
- l'augmentation de connaissances sur ces matériaux (performances, gestion de diversité, maîtrise de la biodégradabilité, identification de ces structures complexes...) sachant qu'il existe « des fibres végétales » ;
- la diffusion des connaissances sur ces matériaux (pour le concepteur et le transformateur mais aussi pour le client final) ;
- la mise en place de filières de recyclage (de démontage et gestion des déchets) ;
- la mise au point de biopolymères ayant un coût compétitif ;
- la prise en compte des impacts sur l'environnement, ce qui impose d'étudier des effets à long terme, or les raisonnements à court terme sont trop souvent privilégiés. Par ailleurs, la durée de vie des produits industriels est très diverse (moins d'un an pour un emballage alimentaire, 12-14 ans pour une voiture, 30 ans pour un bateau de plaisance). Il est nécessaire de connaître la durée de vie du produit mais aussi la durée d'utilisation effective;
- la capacité de faire un écobilan ;
- le développement de technologies industrielles pour transformer ces fibres végétales (comme on sait le faire dans l'industrie textile, papetière et du bois).

Compte tenu du développement des connaissances et de l'évolution de la législation (protection de l'environnement), les biocomposites sont amenés à se développer dans de

nombreux secteurs d'activités comme le montre l'évolution de ce marché via la figure 56. (Balay C 2005)

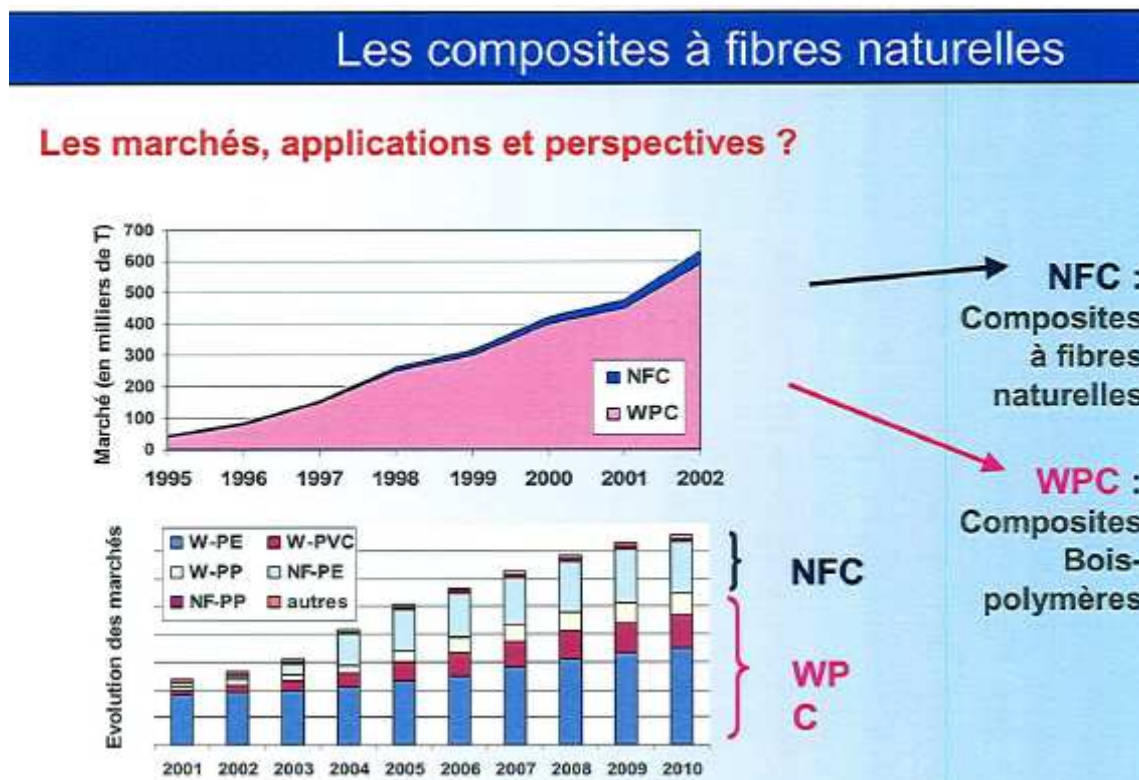


Figure 56: Aperçu sur le marché des composites d'origine naturelle (Baley, 2005)

L'annexe 13 donne plus de détails sur ce secteur en plein expansion

5 Méthodes de comptage et d'identification des fibres

Cette partie est reprise du précédent rapport de l'Afsset sur les FMA (Afsset, 2007). Seul le dernier paragraphe traitant de la comparaison entre microscopie optique et microscopie électronique est nouveau et spécifique aux laines minérales et filaments de verre continus.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour mesurer les expositions aux fibres en suspension dans l'air, la méthode du filtre à membrane analysé par *Microscopie Optique à Contraste de Phase (MOCP)* ne permet que le comptage des fibres en ignorant leur nature, tandis que *la Microscopie Optique à Lumière Polarisée (MOLP)*, *la Microscopie Electronique à Balayage Analytique (MEBA)* et *la Microscopie Electronique à Transmission Analytique (META)* permettent l'identification des fibres et leur comptage.

5.1 Microscopie optique à contraste de phase (MOCP)

C'est la méthode de référence internationale pour l'évaluation de l'exposition professionnelle aux fibres ; en conséquence, les données les plus nombreuses en milieu de travail sont issues d'analyses par MOCP. Recommandée par l'OMS (WHO, 1997), elle fait l'objet de normes internationales (ISO/DIS 8672, 1988) et nationales (AFNOR: Norme XP X 43-269 2002, NIOSH 1994;WHO 1997)

Initialement définie pour mesurer l'exposition aux fibres d'amiante, cette technique, qui ne permet cependant pas l'identification de la nature des fibres prélevées, a été progressivement utilisée dans des situations où se rencontraient d'autres types de fibres comme les FMA (HSE. 1998, WHO 1985)

La MOCP présente l'avantage d'être simple, relativement rapide dans sa mise en œuvre et de permettre des comparaisons entre les différentes études d'hygiène du travail réalisées au niveau international.

A partir de prélèvements d'air personnels ou d'ambiance, les échantillons sont prélevés sur un filtre membrane en ester ou nitrate de cellulose de 0,8 µm de porosité, à un débit de quelques litres par minute (1 à 6 l/min selon la norme AFNOR XP X 43-269). Les prélèvements personnels sont en principe plus représentatifs de l'exposition du travailleur car effectués au moyen d'une pompe portative dont le capteur est placé au niveau des voies aériennes supérieures.

Le filtre est ensuite clarifié puis observé avec un microscope à contraste de phase positif à un grossissement de x400 en général. La méthode d'observation des fibres n'est pas spécifique car uniquement basée sur des critères morphologiques. Elle se limite à compter les objets « fibres » observables dans l'échantillon: une fibre dénombrable est définie comme toute structure dont les bords sont approximativement parallèles, ayant une longueur (L) supérieure à 5 µm, et un rapport longueur / diamètre (L/d) supérieur à 3/1 (la méthode NIOSH 7400 B diffère des autres avec un rapport L/d > 5/1). On distingue les fibres « alvéolaires¹⁸ » de diamètre inférieur à 3 µm, des fibres « non alvéolaires » de diamètre supérieur à 3 µm (WHO/EURO, 1985 ; Inserm, 1999).

¹⁸ De manière générale une fibre est une particule dont le rapport (longueur sur diamètre) L/D>3. La définition des fibres selon l'OMS les caractérise d'un point de vue réglementaire en introduisant deux critères supplémentaires. Un diamètre <3µm et une longueur >5µm. Les valeurs limites d'exposition professionnelle ne prennent en compte que ces fibres. Le terme « fibre alvéolaire » utilisé dans ce rapport correspond au terme anglais « respirable fiber » et concerne les fibres de diamètre < 3 micron

Les résultats sont exprimés en nombre de fibres par millilitre ou centimètre cube d'air prélevé (f/ml ou f/cm³).

Outre le fait que toutes les fibres sont comptées, ceci entraînant une surestimation possible du résultat, il existe un biais qui lui entraîne une sous-estimation de la concentration. En effet, au grossissement utilisé (x400-x500), on s'accorde à situer la résolution d'image des microscopes optiques, c'est-à-dire la limite de visibilité des fibres, entre 0,2 et 0,3 µm (Breyse 1991; Inserm 1997; Inserm 1999; Verma and Clark 1995; WHO 1997; WHO 2007)

Par conséquent, les fibres les plus fines et les plus courtes ne sont pas prises en compte lors des comptages MOCP.

Ce problème, réel lorsqu'il concerne des fibres fines comme les fibres d'amiante (surtout de chrysotile), n'intéresse pas vraiment les laines minérales ou les filaments continus dont les diamètres moyens sont bien plus gros, mais se pose en revanche pour les fibres à usage spécial ou encore certaines FCR. Ainsi, Rood (Rood 1988) situe le diamètre médian des FCR qu'il a étudiées en META vers 0,5-1 µm et détecte entre 80 % et 90 % de ces fibres en MOCP.

5.2 Microscopie optique à lumière polarisée (MOLP)

Cette méthode permet de discriminer les fibres selon leurs caractères morphologiques et optiques (isotropie, indice de réfraction) et ainsi de séparer les fibres cristallines anisotropes de celles ayant une structure amorphe, vitreuse, et donc isotrope parmi lesquelles les FMA (Breyse 1991; 1998, Schneider T 1986) On dispose ainsi d'un moyen d'identification partielle. Cette méthode classiquement utilisée en France pour décrire les expositions environnementales aux FMA a été adaptée de la méthode indirecte de mesure des concentrations d'amiante dans l'environnement général (Gaudichet et al. 1989). Le prélèvement d'air est effectué à 5 l/mn sur une membrane en cellulose de 0,45 µm de porosité, laquelle est ensuite incinérée à basse température dans un four à plasma en vue de détruire le filtre et les particules organiques. Les cendres reprises en phase liquide sont filtrées à nouveau sur une membrane en cellulose, transparisée puis montée entre lame et lamelle.

L'observation est réalisée au moyen d'un microscope optique à lumière polarisée à un grossissement de x200. Les fibres de plus de 5 µm de longueur et de rapport longueur/diamètre supérieur à 3 sont comptées. On classe en deux catégories les fibres : celles alvéolaires de diamètre < 3 µm, et celles non-alvéolaires de diamètre > 3 µm. Les résultats sont exprimés en fibres par mètre cube d'air prélevé (f/m³). Les prélèvements étant en général réalisés sur plusieurs jours avec une dizaine de m³ et le filtre étant lu en entier, la sensibilité d'analyse est voisine de 0,1 f/m³.

En pratique, l'utilisation de cette technique est limitée à des fibres de diamètre supérieur à 0,5 µm (McCrone 1974) ou 1 µm (WHO, 1998 ; HSE, 1998).

L'analyse de prélèvements de dépôts surfaciques peut également et utilement renseigner sur l'existence de sources actives de FMA et de leur sédimentation, notamment pour des fibres de grandes dimensions qui peuvent échapper au prélèvement d'air (Schneider et al. 1990). Les fibres sont alors récupérées sur des surfaces planes au moyen de rubans adhésifs double-face montés ensuite entre lame et lamelle et observés dans les mêmes conditions que les prélèvements d'air.

5.3 Microscopie Electronique à Balayage Analytique (MEBA) et Microscopie Electronique à Transmission Analytique (META)

Ces deux méthodes sont beaucoup plus performantes au niveau de l'identification des fibres mais sont plus lourdes et plus coûteuses dans leur mise en œuvre. En outre, à durée de

prélèvement égale, elles ont en général des sensibilités analytiques moins bonnes que la MOLP. En effet, aux forts grossissements utilisés en microscopie électronique, la surface de filtre observée est beaucoup plus faible, ce qui dégrade de fait la sensibilité du comptage.

5.4 MEBA

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB), couplée avec un spectromètre en dispersion d'énergie de rayons X (SDEX), permet d'analyser les fibres sur la base de leur aspect morphologique et de leur composition chimique élémentaire. On dispose ainsi d'une identification assez complète. Cette méthode est décrite dans la norme ISO/FDIS 14966 (2002) dérivée de la méthode de référence allemande VDI 3492 (1991 et 1994). Bien que principalement dédiée à la mesure de la concentration en fibres d'amiante dans l'air lors de travaux de rénovation, démolition ou maintenance, cette méthode peut être adaptée à la mesure des concentrations de FMA.

Le prélèvement d'air peut être réalisé avec une membrane en ester de cellulose ou en polycarbonate pré-métallisée à l'or. L'observation, l'analyse et le comptage sont effectués à un grossissement de x2000 ou plus. A x2000, le diamètre minimum des fibres détectables et analysables en routine est de l'ordre de 0,2 µm.

Les résultats sont exprimés en f/m³.

5.5 META

La Microscopie Electronique à Transmission (MET) couplée avec un spectromètre en dispersion d'énergie de rayons X (SDEX) est la méthode la plus performante vis-à-vis de la détection des fibres les plus fines. La résolution maximale du MET est d'environ 0,0002 µm, avec une résolution en routine de 0,01 µm (WHO, 1998). Les fibres de l'ensemble de la distribution granulométrique peuvent ainsi être prises en considération. Néanmoins, les FMA ont souvent des dimensions importantes rendant l'observation en META inadaptée. Même si cette méthode permet de discriminer les fibres minérales, elle n'est pas recommandée pour les FMA (HSE, 1998).

Deux méthodes de prélèvement et d'analyse définies au départ pour les fibres d'amiante se distinguent : la méthode directe (ISO 10312, 1995) et la méthode indirecte (AFNOR: Norme NF X 43-050 1996; ISO 10312 1995) laquelle passe par une incinération du filtre de prélèvement en ester de cellulose et une nouvelle concentration des cendres sur une membrane en polycarbonates.

Les fibres sont identifiées sur la base de leur aspect morphologique, de leur structure cristallographique par microdiffraction électronique et de leur composition chimique élémentaire déterminée au moyen du SDEX.

5.6 Comparaison entre microscopie optique et microscopie électronique

MOLP et MEBA sont les méthodes les plus adaptées à la mesure des expositions environnementales. Les fibres rencontrées dans l'air des bâtiments peuvent avoir différentes natures, et la MOCP, ne convient pas puisqu'elle ne permet pas leur identification. Par ailleurs, si la META par sa très bonne résolution est préconisée pour rechercher des fibres fines, elle n'est pas recommandée au vu de la taille plus importante des laines minérales.

MOLP et MEBA conduisent à mesurer des niveaux de concentrations très différents. Les niveaux de FMA dans l'air mesurés dans les bâtiments par ces deux méthodes diffèrent d'un à deux ordres de grandeur. En effet, les concentrations retrouvées varient de 1 à quelques

centaines de fibres/m³ d'air prélevé en MOLP (Gaudichet et al., 1989) à environ 1000 à 5000 fibres/m³ en MEBA (Schneider et al. 1990).

Ces deux méthodes ont fait l'objet d'une étude comparative (Boullanger C and Martinon L 2007) à partir d'une vingtaine de prélèvements effectués en chambre de simulation et sur chantiers de retrait de laines minérales avec des mesures en parallèle en MOLP (à un grossissement de x200) et en MEBA (à x2000). Il est très difficile d'établir une relation entre les deux méthodes. Sur le terrain, les résultats confirment les données de la littérature où les niveaux mesurés en MEBA sont en général d'un à deux ordres de grandeur supérieurs à ceux mesurés en MOLP. Dans la chambre de simulation, par contre, les écarts entre les méthodes sont beaucoup plus faibles. Cette différence entre terrain et chambre de simulation pourrait être liée à la granulométrie des fibres en présence et à la distance entre les points d'émission et de mesure. En effet, les fibres prélevées dans l'air étaient plus courtes et plus fines sur le terrain que dans la chambre de simulation. L'observation à x 2000 en MEBA permet de mieux détecter les fibres plus courtes et plus fines, tandis que la MOLP aux grossissements d'usage (ici x 200) a une résolution plus faible, en théorie de 0,2 µm, en pratique de 0,5 µm. Les populations de fibres observées par chacune des méthodes sont donc différentes. La MEBA détecte bien les fines, par contre sous-estime les fibres de plus grande taille, au contraire de la MOLP, notamment pour les fibres non alvéolaires. Il est ainsi caractéristique de voir que dans la plupart des échantillons, les fibres supérieures à 3 µm de diamètre n'étaient pas vues en MEBA.

MEBA présente une sensibilité d'analyse nettement moins bonne que la MOLP. En effet, la surface de filtre balayée est considérablement plus petite dans le premier cas en raison du grossissement plus élevé utilisé.

Les limites de la MEBA ont été constatées dans les essais où les niveaux d'émission de laines minérales sont faibles (inférieurs à 0,002 f/cc) : dans ce cas la MEBA, contrairement à la MOLP, ne permet pas de les détecter. Or, c'est dans cette gamme de concentrations que se situent les niveaux d'empoussièrtements en FMA dans l'environnement.

Par ailleurs, dans cette étude de comparaison des méthodes de mesure, deux techniques de préparation des échantillons ont été testées avant analyse en MOLP. Il s'agissait des méthodes indirecte (où l'échantillon est incinéré afin de détruire les particules organiques avant refiltration et observation) et directe (où le filtre est directement clarifié et observé). Les résultats sont très proches d'une méthode à l'autre avec une très bonne corrélation. Ceci par contre n'est plus valable quand l'empoussièrtement est trop important rendant l'observation directe difficile.

6 Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs aux laines minérales et aux filaments de verre continus

6.1 Exposition de la population générale

6.1.1 Les laines minérales dans les bâtiments

L'exposition de la population générale peut être classée en deux catégories selon la source de pollution :

- Pollution émise par une source industrielle ponctuelle (usine de production de laines minérales) projetant dans le voisinage des fibres alvéolaires pouvant être inhalées par les personnes vivant ou travaillant dans l'environnement immédiat de cette source (Schneider et al. 1990).
- Pollution émise par les laines minérales mises en place dans les bâtiments, qui peuvent être relarguées dans l'atmosphère, soit du fait d'une dégradation des installations, soit du fait d'interventions sur celles-ci. Dans cette catégorie sont classées les expositions des occupants des bâtiments dont l'activité habituelle ne les amène pas à intervenir sur les matériaux contenant des fibres, mais pouvant inhaler des fibres alvéolaires relarguées (Antoine, 2002).

Il existe très peu de renseignements empiriques sur le devenir des FMA dans l'environnement. Toutefois, selon leurs propriétés physiques et chimiques, la plupart des FMA sont assez stables et semblent persister dans l'environnement.

Dès qu'elles sont rejetées par les gaz de combustion ou pendant la manipulation des produits, la plupart des FMA sont susceptibles de retomber naturellement sur le sol. Les particules fines de petit diamètre demeureront en suspension plus longtemps et pourront aussi être transportées plus loin de leur point d'origine (Marconi *et al.* 1987). La sédimentation gravitationnelle et la dissolution semblent les principaux mécanismes d'élimination des FMA (WHO, 1988).

Les FMA peuvent être libérées dans l'environnement pendant leur production, leur installation, leur retrait et/ou leur mise en décharge (IARC, 2002). Certains auteurs ont rapporté la présence de fibres de verre (sans toutefois quantifier les concentrations) dans les boues d'égouts municipaux de 5 grandes villes des États-Unis (Bishop et al. 1985).

Les données relevées sur les concentrations de FMA dans les milieux environnementaux se limitent à quelques études à l'intérieur et à l'extérieur de bâtiments en Europe et aux États-Unis. Les méthodes de prélèvement et de comptage employées peuvent varier d'une étude à l'autre : débit, temps d'échantillonnage, résolution des microscopes MOCP, MOLP, MEBA ou encore META (voir chapitre *Méthodes de comptage et d'identification des fibres*), surface d'échantillon analysée, etc... sont autant de facteurs méthodologiques qui ont une influence sur les résultats des mesures des concentrations dans l'air (Inserm, 1999). De plus, certaines méthodes permettent une identification partielle de la nature des fibres (fibres isotropes en MOLP) ou quasi complète (composition chimique en MEBA et META), et il faut donc les distinguer des comptages « toutes fibres » (MOCP).

Ceci rend difficile le travail d'interprétation et de comparaison des données. Les ordres de grandeurs des résultats pouvant s'avérer différents d'une méthode de comptage à l'autre, il est prudent de ne comparer entre elles que les données acquises de la même manière.

6.1.1.1 Bâtiments non résidentiels

Une étude française (Gaudichet *et al.* 1989) fait apparaître des valeurs de concentrations mesurées dans différents bâtiments par MOLP. Les matériaux étudiés sont des flocages sous plafonds, des matériaux de surface associés avec des systèmes de ventilation ou d'air conditionné, des panneaux muraux. Les prélèvements ont été réalisés pendant les heures d'occupation des locaux. De très larges variations de concentrations ont été mesurées, allant de 0,2 à 6778 f/m³¹⁹(fibres totales) et de 0 à 6230 f/ m³ (fibres alvéolaires²⁰). Pour établir une comparaison, 18 niveaux de concentrations extérieures à Paris ont été mesurés. Les niveaux de fond s'échelonnaient entre 0,3 et 22 f/m³ (fibres totales) et entre 0 et 15 f/ m³ (fibres alvéolaires).

Depuis cette étude (Cf. figure 57), une seconde exploration des données du LEPI, mesurées de 1993 à 2007 par MOLP, dans des bâtiments ayant des matériaux à base de FMA a été réalisée totalisant 204 prélèvements dans 35 bâtiments (données non publiées). Ces enquêtes avec prélèvements d'air sont en général conduites en raison de plaintes exprimées à la suite de manifestations irritatives (cutanées, oculaires ou respiratoires) parmi les occupants sans qu'un lien soit forcément établi entre les résultats de mesure et les gênes exprimés. Des niveaux de FMA alvéolaires allant de 0,1 à 13890 F/ m³ sont enregistrés, avec pour valeur moyenne 197 F/ m³. Les FMA non alvéolaires sont à des niveaux plus faibles : de 0,1 à 2790 F/ m³ pour une valeur moyenne de 40,9 F/ m³. Les valeurs maximales correspondaient à des situations où le matériau était friable ou dégradé, et perturbé soit par la ventilation soit par des interventions directes. Le tableau 40 reprend en fonction des matériaux en place les niveaux minima et maxima, les médianes et les valeurs moyennes de FMA dans l'air mesurés par MOLP.

¹⁹ Pour rappel, 1 fibre/m³ correspond à 1x10⁻⁶ fibre/ml

²⁰ De manière générale une fibre est une particule dont le rapport (longueur sur diamètre) L/D>3. La définition des fibres selon l'OMS les caractérise d'un point de vue réglementaire en introduisant deux critères supplémentaires. Un diamètre <3µm et une longueur >5µm. Les valeurs limites d'exposition professionnelle ne prennent en compte que ces fibres. Le terme « fibre alvéolaire » utilisé dans ce rapport correspond au terme anglais « respirable fiber » et concerne les fibres de diamètre < 3 micron

Ces valeurs sont à comparer aux niveaux maxima retrouvés dans l'air extérieur de l'agglomération parisienne (Martinon et al, 1996) : de 1,7 F/ m³ pour les fibres alvéolaires à 3,1 F/ m³ pour les non-alvéolaires (voir plus loin Environnement urbain et rural).

Tableau 40: Résultats de mesure en MOLP dans des bâtiments

| Type de matériau contenant des FMA | Nombre de bâtiments | Concentrations en FMA (F/ m ³) de diamètre <= 3 µm | | | | Concentrations en FMA (F/ m ³) de diamètre > 3 µm | | | |
|------------------------------------|---------------------|---|-------|---------|---------|--|------|---------|---------|
| | | mini | Maxi | Médiane | Moyenne | mini | Maxi | Médiane | Moyenne |
| | | Flocage | 21 | 0,2 | 13890 | 3,9 | 347 | 0,1 | 2790 |
| Rouleaux | 4 | 0,2 | 5 | 2,4 | 2 | 0,3 | 7,8 | 1,3 | 2,1 |
| Faux-plafonds | 3 | 0,36 | 58 | 2 | 1,2 | 0,1 | 366 | 0,8 | 23 |
| Matériaux mixtes | 7 | 0,1 | 42 | 1,3 | 3,3 | 0,1 | 6,7 | 0,9 | 1,3 |
| Total | 35 | 0,1 | 13890 | 2,5 | 197 | 0,1 | 2790 | 1,3 | 40,9 |

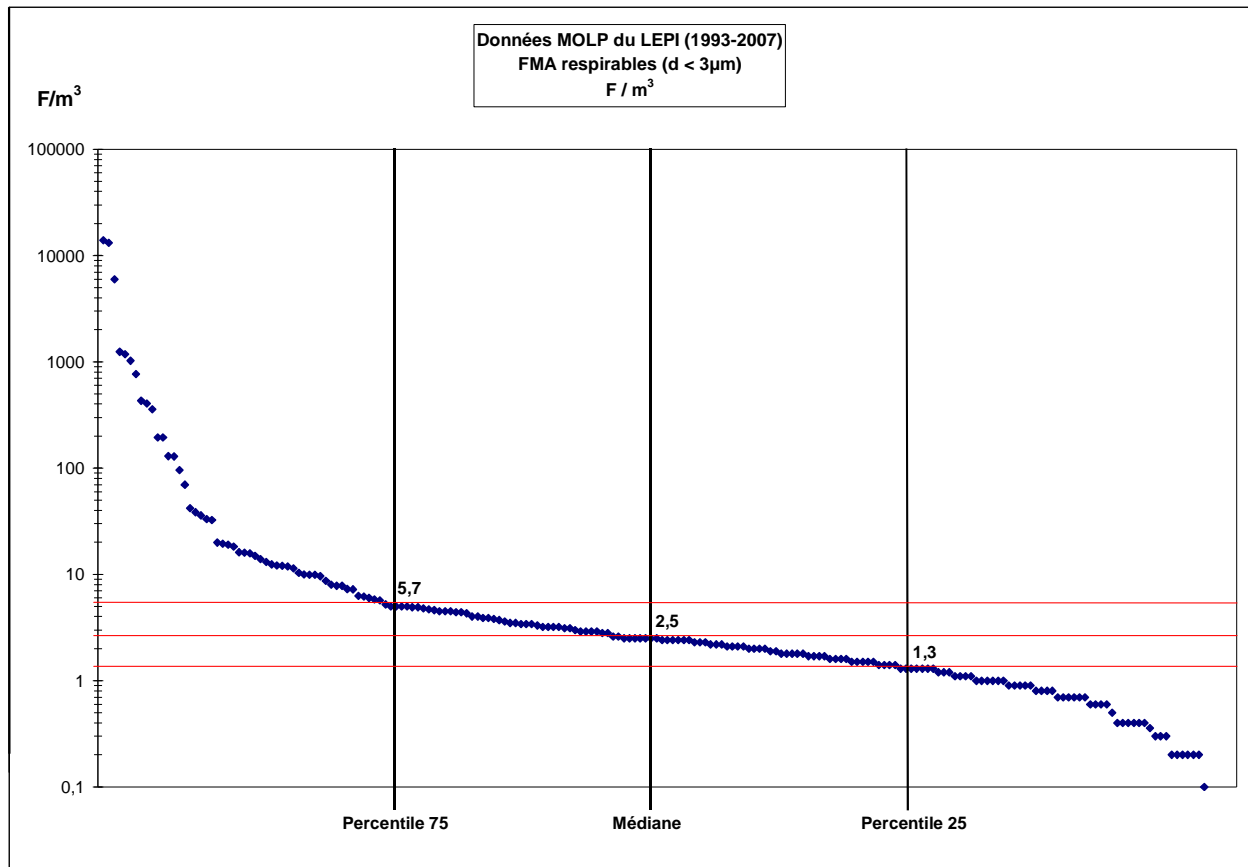


Figure 57: Synthèse des mesures MOLP de FMA alvéolaires dans des bâtiments classés par ordre décroissant

D'autres données sont disponibles dans la littérature :

Schneider a mesuré par MOLP des concentrations allant de 0 à 240 FMA alvéolaires / m³ (avec des débits de prélèvement de 4 l/mn), au Danemark, dans onze écoles munies de système de ventilation mécanique et choisies aléatoirement. Dans sept autres établissements (écoles, jardins d'enfants, bureau) ayant des problèmes supposés liés aux FMA, les mesures présentaient des résultats plus élevés de 230 à 84000 FMA alvéolaires / m³ (l'air était prélevé à un débit plus fort, de 20 l/mn) (Gaudichet *et al.*, 1989; Schneider *et al.* 1986,).

Schneider *et al.* ont réalisé une étude dans 105 pièces de bâtiments publics contenant des faux-plafonds à base de laines minérales en excluant celles ayant des panneaux de faux-plafonds endommagés et celles avec des problèmes notables au niveau du climat intérieur. Les concentrations moyennes mesurées par MOLP s'échelonnent de 17 à 210 fibres alvéolaires / m³. (Schneider *et al.* 1990)

Thriene *et al.* ont mesuré les concentrations en fibres dans un bâtiment administratif équipé de panneaux de plafonds acoustiques à base de FMA. Ces mesures faisaient suite à des plaintes des employés, essentiellement pour irritation cutanée et oculaire. Les bords des panneaux étaient partiellement endommagés (Tiesler *et al.* 1993). Les mesures de concentration ont été réalisées sur des échantillons stationnaires par microscopie électronique à balayage (MEBA) suivant la méthode VDI 3492 (VDI 1994). Les concentrations en fibres de diamètre < 3 µm étaient de 1 000 à 3 500 f / m³ et celle en fibres

de diamètre > 3 µm de 100 à 200 f/ m³. Une expérience de scellement des bords des panneaux a ramené les concentrations en fibres dans les locaux à des valeurs proches de zéro.

La monographie du CIRC (IARC, 2002) rapporte un certain nombre d'études sans pour autant indiquer la technique de mesures utilisée. Tiesler et Draeger (1993) et (Tiesler, *et al.* 1993;VDI 1994) ont publié plus de 130 mesures réalisées dans différents bâtiments. La plupart des prélèvements provenait de bureaux et les autres ont été réalisés dans des écoles, maisons ou laboratoires. Les bâtiments sélectionnés présentaient des produits visibles à base de laines minérales, scénario apparaissant le plus défavorable. Les auteurs ont conclu que les concentrations moyennes totales de fibres inorganiques s'élevaient à 4 600 f/ m³ (0 - 38 000 f/ m³). Les fibres de FMA (a priori identifiées par MEBA) représentaient 25 % de la distribution des fibres avec une concentration moyenne calculée à 600 f/ m³ (0 – 5 700 f/ m³). Parallèlement, 39 échantillons extérieurs furent collectés. La concentration moyenne des fibres inorganiques (excluant l'amiante) s'élevait 4 990 f/ m³. Les auteurs ont conclu que les concentrations de fibres issues de prélèvements intérieurs ou extérieurs étaient généralement du même ordre de grandeur.

Fischer (1993) a rapporté les concentrations de fibres mesurées dans 7 bureaux, une école, une résidence et un groupe de 6 bâtiments (un commerce, une école, un jardin d'enfants) dans lesquels les propriétaires avaient averti d'une possible exposition aux poussières de fibres à partir de dalles de faux-plafonds. Les concentrations moyennes de fibres inorganiques s'élevaient à 1 800 f/ m³ ; la concentration des FMA s'élevant à 300 f/ m³ (17 % des fibres inorganiques). La concentration extérieure des FMA était du même ordre de grandeur.

Carter *et al.* ont publié les concentrations de FMA mesurées dans 51 bâtiments commerciaux et résidentiels à travers les Etats-Unis (Carter CM et al. 1999). Tous les échantillons ont été analysés par MOCP et 50 échantillons sélectionnés aléatoirement ont été analysés par MEBA. La concentration moyenne de toutes les fibres alvéolaires comptabilisées par MOCP s'élevait à 0,008 f/ ml. 97 % des fibres alvéolaires identifiées était de nature organique. Les concentrations de fibres alvéolaires inorganiques, incluant les FMA mesurées par MEBA, étaient inférieures à 100 f/ m³.

6.1.1.2 Pose d'isolant à base de FMA dans des bâtiments résidentiels

Les activités de pose et de retrait d'isolants à base de FMA dans les bâtiments résidentiels sont la plupart du temps réalisées par des professionnels. Cependant, des particuliers peuvent également entreprendre ces travaux, ce constat expliquant que ces données soient présentées dans ce chapitre.

Van der Wal *et al.* ont mesuré les concentrations en fibres dans l'air de maisons d'habitation pendant et après soufflage de FMA (laine de verre ou de laine de roche) dans des murs creux (Van der Wal *et al.*, 1987). Les concentrations moyennes de fibres alvéolaires mesurées à l'intérieur des maisons par MOCP varient de 0,005 à 0,025 f/ ml, avec un pic à 0,065 f/ ml pendant le soufflage et de 0,001 à 0,01 f/ ml le jour suivant. En parallèle, des mesures en META oscillaient de 50 000 à 450 000 f/ m³.

Jacob *et al.* ont rapporté les concentrations moyennes de laine de verre mesurées dans 74 maisons avant et après l'installation d'isolation de laines minérales par soufflage ou pose de rouleaux (JACOB *et al.* 1992). Les concentrations moyennes, mesurées en MOCP, étaient inférieures ou égales à 2 x 10⁻⁴ f/ ml (0,04 f/ ml pendant l'installation de rouleaux et 0,3 – 0,82 f/ ml pendant le soufflage de laines minérales). Les auteurs rapportent que les concentrations ambiantes mesurées après la nuit des travaux correspondaient à celles mesurées avant le début du chantier.

Jaffrey a effectué une étude au Royaume-Uni dans 12 habitations (250 échantillons) avant, pendant et après installation d'isolation à base de FMA (laine de verre et de roche, en matelas ou soufflée) (Jaffrey SAMT. 1990; Jaffrey et al. 1990). Les analyses ont été réalisées par META. Les résultats sont inférieurs à 2 000 f/ m³ (sensibilité analytique) avant (2-3 jours) et une semaine après l'installation.

Dans une étude similaire, Miller a mesuré avant l'installation de produits isolants à base de FMA dans 14 maisons, des concentrations en fibres s'échelonnant entre 0,002 et 0,011 f/ ml par MOCP (méthode NIOSH 7400 A) (Miller *et al* 1995). Les concentrations mesurées 24 h après installation de l'isolation vont de 0,003 à 0,015 f/ ml. Toutes les concentrations en FMA mesurées par microscopie électronique à balayage au cours de cette étude sont inférieures à 10 000 f/ m³.

Jaffrey *et al.* (1990) ont également mesuré, par META, les concentrations en fibres lors de chocs répétés (perturbations mineures) ou de manipulations prolongées (perturbations majeures) des isolations de combles en place. Pour les perturbations mineures, aucune fibre n'a été détectée dans 6 des 11 échantillons stationnaires prélevés, la concentration maximale étant de 9 000 f/ m³; les échantillons individuels montrent des valeurs s'échelonnant entre < 20 000 et 110 000 f/ m³. Lors de perturbations majeures, les concentrations relevées à proximité s'échelonnaient entre 2 000 et 32 000 f/ m³ pour les échantillons statiques et de < 9 000 à 200 000 f/ m³ pour les échantillons personnels

Dodgson a rapporté les concentrations de fibres dans 10 résidences (MOCP et MEBA) tout de suite après, 1 journée après et 7 jours après l'installation ou une modification de l'isolation à base de laines minérales (Dodgson J. *et al* 1990). La concentration moyenne de FMA mesurée 24 heures après la pose de l'isolant dans une résidence neuve était proche de celle mesurée avant les travaux, les concentrations par MEBA s'élevant de 100 à 300 f/cm³.

6.1.1.3 Retrait de laines minérales isolantes

Ces produits isolants vieillissent et la réhabilitation d'immeubles implique fréquemment leur remplacement, donc leur enlèvement. Or, il existe peu de données sur le vieillissement des matériaux à base de laines minérales isolantes, sur la libération de FMA lors d'opérations de retrait, et l'exposition des travailleurs de ce secteur d'activités ainsi que la pollution environnementale résultante sont assez mal cernés.

En partenariat avec le CSTB, une étude (financée par l'Afsset) a été réalisée en 2007 (Boullanger C *et al*, 2007), visant à caractériser les émissions de FMA dans l'air sur deux chantiers de retrait de vieilles laines d'isolation (des essais de manipulation de ces produits en chambre de simulation ont aussi été réalisés (données présentées en Annexe 9).

Le premier chantier était une opération de dépose de rouleaux de laine de verre et de dalles de faux-plafonds (posés en 1978) dans des bureaux, le second consistait en un retrait de flocages de laine de laitier (posé vers 1978-79) dans un parking. L'enlèvement des rouleaux a été opéré à sec tandis que celui de flocage était réalisé par projection d'eau sous pression.

Des prélèvements individuels (analysés en MOCP) ainsi que des prélèvements d'ambiance près de l'opérateur et à distance (analysés en MOCP, MOLP et MEBA) ont été conduits.

Les données d'exposition individuelles en MOCP sont inférieures à la valeur limite d'exposition professionnelle indicative de 1 f/ml avec 0,38 f/ml en fibres alvéolaires (diamètre inférieur à 3 µm) pour l'enlèvement des rouleaux et de 0,016 à 0,075 f/ml pour l'enlèvement de flocage.

Les données d'exposition environnementales sont résumées dans le tableau 41 pour chacune des méthodes.

Tableau 41: mesures MOLP de FMA alvéolaires sur chantiers de retrait de LMI (Boullanger, 2007)

| f/ml (diamètre < 3 µm) | | MOCP | MOLP (méthode indirecte) | MEBA |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Retrait de rouleaux | Mesures à proximité | - | 0,067 | 0,416 |
| | Mesures à distance (4 m) | - | 0,028 | 0,175 |
| Retrait de flocage | Mesures à proximité | de 0,038 à 0,087 | de 0,014 à 0,036 | de 0,821 à 0,836 |
| | Mesures à distance (30 m) | de 0,003 à 0,006 | de 0,0002 à 0,0003 | de 0,0048 à 0,0088 |

Il n'existe pas de valeurs limite pour l'environnement et pas non plus pour les chantiers de retrait de matériaux à base de laines minérales. Les données de la littérature sont assez rares en ce domaine. De plus, en France, on n'a pas de recul sur les données en MEBA, cette technique étant peu utilisée.

Cependant, les résultats en MOLP collectés ici sur chantiers, près des opérateurs, dépassent les maxima rencontrés au travers des études dans l'environnement intérieur menées par le LEPI, à savoir environ 14000 f/m³ (0,014 f/ml) pour les fibres alvéolaires (voir tableau 41 et figure 57) et 17000 f/m³ (0,017 f/ml) toutes fibres.

Concernant les résultats en chambre de simulation, s'il est difficile de les extrapoler à une situation réelle de terrain, il faut souligner que la sollicitation des matériaux à base de FMA bien que non manuelle et limitée dans le temps (10 à 20 minutes) a conduit néanmoins à des concentrations élevées, en général supérieures à celles retrouvées sur le terrain.

La très grande majorité des fibres observées dans l'air sont des fibres alvéolaires, de diamètre inférieur à 3 µm.

Un point important concernant l'exposition environnementale et des travailleurs, au cours de chantiers de retrait est le respect ou non de procédures visant à limiter l'émission et la dispersion de fibres, d'autant que certains matériaux (comme des rouleaux par exemple), vieux de plusieurs dizaines d'années, sont très friables.

L'absence de confinement de la zone des travaux peut entraîner une dissémination et des dépôts de fibres dans les zones adjacentes et il n'est pas rare dans ces cas de voir apparaître des symptômes irritatifs, de type cutané, oculaire, voire respiratoire.

6.1.1.4 Environnement urbain et rural

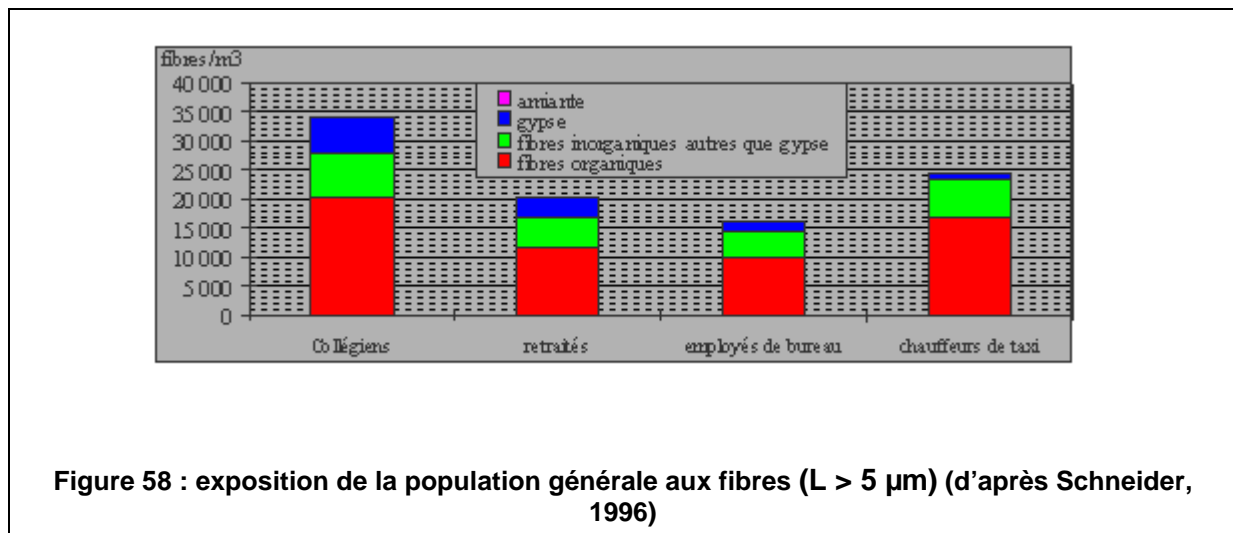
Une première étude, citée précédemment, réalisée en France en 1989 (Gaudichet *et al.* 1989) par microscopie optique en lumière polarisée (MOLP), à l'intérieur (79 échantillons) et à l'extérieur (18 échantillons) de bâtiments publics contenant des matériaux isolants à base de FMA sous différentes formes (flocages, panneaux, etc), donne des concentrations pour les fibres de diamètre inférieur à 3 µm variant de 0 à 6 200 f/ m³ à l'intérieur et de 0 à 15 f/ m³ à l'extérieur.

Une deuxième étude a été réalisée par la même équipe avec la même méthode pendant un an à Paris (Dodgson *et al* 1990, Martinon *et al* 1996) en vue d'évaluer le niveau

d'empoussièrement extérieur de l'agglomération parisienne. Sur 116 échantillons, les valeurs rapportées en fibres alvéolaires vont de 0,06 à 1,7 f/ m³ avec des moyennes de 0,4 à 0,7 f/ m³.

Une étude pilote plus générale a été réalisée au niveau européen (Schneider *et al.* 1996) dans le but de définir l'exposition individuelle (incluant l'environnement intérieur et extérieur) aux fibres alvéolaires inorganiques et organiques, durant la vie courante dans trois villes d'Europe. Quatre groupes de 5 personnes ont été choisis: écoliers, retraités, employés de bureaux et chauffeurs de taxis. Les échantillons individuels prélevés sur 24 heures ont été analysés au MEBA suivant la méthode VDI 3492 (VDI 1994). Les concentrations en fibres organiques sont en général supérieures à celles des fibres inorganiques (gypse et amiante étant comptés à part).

La concentration des fibres minérales synthétiques n'excède pas 30 % de celle du groupe des autres fibres inorganiques, quelle que soit leur longueur (longueur minimum mesurée: 2,5 µm), soit environ 2 000 f/ m³.



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

6.1.1.5 Autres données synthétisées

La thèse d'Antoine (2002) cite le rapport du MRC Institute for environment and health (1997) qui a recensé une partie des données existantes sur l'exposition environnementale aux FMA. Les concentrations mesurées dans différents pays sont indiquées dans le tableau 42. Le tableau reprend également les données présentées dans la monographie du CIRC (IARC, 2002) ou décrites précédemment dans cette partie.

Tableau 42: Synthèse de données de la littérature quant à l'exposition de la population générale aux laines minérales

| Auteurs | Fibres alvéolaires | Méthode | Locaux et matériaux étudiés | Pays |
|---|--|---------|---|---------------|
| Bâtiments non résidentiels | | | | |
| Gaudichet et al (1989) | 0 à 6230 x f/m ³ ²¹ | MOLP | Flocages sous plafonds, matériaux de surface, panneaux muraux | France |
| | 0 à 15 f/ m ³ | MOLP | Extérieur Paris | |
| Schneider (1996) | 0 à 240 f/ m ³ | MOLP | Ecoles | Danemark |
| Schneider et al (1990) | 17 à 210 f/ m ³ | MOLP | Faux plafonds dans bâtiment public | Danemark |
| (Thierne B et al. 1996) | 1000 à 3500 f/ m ³ (< 3 µm) | MEBA | Panneaux de plafonds acoustiques dans un bâtiment administratif | |
| (Cholak J and Schafer L 1971) | < 0,005 f/cm ³ | MOCP | Locaux présentant des conduites d'air doublé par de la laine minérale | |
| (Rindel A et al. 1989) | < 0,0002 f/cm ³ (1 heure) | MOCP | Jardins d'enfants | Danemark |
| (Nielsen 1987, Schneider et al. 1990) | 0 à 0,002 f/cm ³ | | Panneaux de plafonds acoustiques | Danemark |
| Schneider (1986) | 0 à 80000 f/ m ³ | MOLP | 16 écoles et un bureau | Danemark |
| Schneider (1986) | 0 à 110 f/ m ³ | | Ecoles et crèche | Danemark |
| Tiesler et Draeger (1993) Tiesler et al (1993) | 0 à 5700 f/m ³ (concentration moyenne calculée à 600 f/m ³) | MEBA ? | Bâtiments (bureaux, écoles, maisons ou laboratoires) | Allemagne ... |
| | | MEBA ? | | |
| Fischer (1993) | 300 f/m ³ | MEBA ? | 7 bureaux, école, résidence et un groupe de 6 bâtiments (commerce, école et jardin d'enfants). Exposition potentielle à partir de dalles de faux plafonds | |
| Carter et al (1999) | < 0,0001 f/cm ³ | MOCP | 51 bâtiments commerciaux et résidentiels | Etats-Unis |
| Rindel <i>et al.</i> (1989) | 0,000097 – 0,00011 f/cm ³ | MOCP | Ecoles et crèches contenant des FMA | Danemark |

²¹ Pour rappel, 1 fibre/m³ correspond à 1x10⁶ fibre/ml

| | | | | |
|--|---|--------|--|---------------------|
| | 0,000041 f/cm ³ | | Ecoles et crèches sans FMA | |
| Bâtiments résidentiels | | | | |
| Van Der Wal et al (1987) | 0,001 à 0,065 f/ml | MOCP | Résidences (pendant et après soufflage de laines minérales dans les murs creux) | Pays-Bas |
| | 50000 à 400000 f/ m ³ | META | Pose d'un isolant soufflé de laines minérales dans une résidence | |
| Jacob et al (1992) | 0,0002 f/cm ³ 0,04 f/cm ³ (installation) 0,3 à 0,82 f/cm ³ (soufflage) | MOCP | Résidences (après l'installation d'isolation de laines minérales par soufflage ou pose de rouleaux) | |
| Jaffrey (1990) et Jaffrey et al (1989) | 2000 à 40 000 f/ m ³ | META | Résidences (avant, pendant et après l'installation de laines minérales par soufflage ou pose de matelas) | Royaume-Uni |
| Jaffrey et al (1990) | 0 à 10000 f/ m ³ (stationnaire / chocs répétés) 30000 à 110000 f/ m ³ (individuel / chocs répétés) < 2000 à 300000 f/ m ³ (stationnaire / manipulations prolongées) < 9000 à 200000 f/ m ³ (stationnaire / manipulations prolongées) | META | Chocs répétés ou manipulations prolongées d'isolants dans les combles | Royaume-Uni |
| Miller et al (1995) | 0,002 à 0,011 f/ml (avant installation) 0,003 à 0,015 f/ml (24h après l'installation) | MOCP | Résidences (avant et après installation) | Etats-Unis a priori |
| | < 10000 f/ m ³ | MEBA | | |
| Dodgson et al (1987) | 100 à 300 f/ m ³ | MEBA | Résidences (après, 1 jour après et 7 jours après l'installation ou modification de l'isolation) | |
| Spumy (1993) | 0,00001 f/ml | MEBA ? | Pose d'isolants, fibres fines | Allemagne |
| | 0,01 f/ml | | Maisons neuves | |
| | 0,005 f/ml | | Maisons anciennes | |

| Environnement urbain et rural | | | | |
|---|---|------------|--|-------------------------|
| Gaudichet et al (1989) | 0 à 6200 f/ m ³ (< 3 µm) | MOLP | Intérieur des bâtiments (flocage, panneaux...) | France |
| | 0 à 6 f/ m ³ (< 3 µm) | | Extérieur | |
| Martinon et al (1996) | 0,06 à 1,7 f/ m ³ avec des moyennes de 0,4 à 0,7 f/ m ³ | MOLP | Extérieur | France |
| Schneider et al (1996) | < 2000 f/ m ³ pour les fibres synthétiques | MEBA | Individuel (écolier, retraités, employés de bureaux et chauffeurs de taxi) | Europe (3 métropoles) |
| Höhr (1985) | 2 x 10 ⁻⁶ f/ml (zones rurales) | Méthode ?? | Extérieur (zones urbaines et rurales) | Allemagne et Etats-Unis |
| Balzer (1976) | 0,0017 f/ml (zones urbaines) | | | |
| Switala et al (1994) | 90 % des échantillons sous la limite de détection à 0,00001 f/ml (max à 0,00014 f/ml autour de l'usine et 0,00015 f/ml en milieu rural) | MOCP | A proximité d'une usine de laine de verre et zone rurale | |
| (Spurny KR and Stöber W 1981) cité dans (Antoine, 2002) | 0,0008 à 0,01 f/ml | Méthode ?? | Zones urbaines et rurales | Allemagne |
| Meek (1991) cité dans (Antoine, 2002) | 0,00004 f/ml | Méthode ?? | Fond de pollution rural | Allemagne |
| | 0,007 f/ml | | Fond de pollution urbain | |
| | 0,00004 à 0,00025 f/ml | | | Danemark |
| Tolvanen et al (1993) cité dans (Antoine, 2002) | 0,003 f/ml | Méthode ?? | Fon de pollution | Finlande |

Les niveaux ambiants sont généralement inférieurs à 0,00005 f/ml et les niveaux les plus forts sont mesurés dans des espaces clos tels que les greniers (0,19 f/ml).

Le tableau 43 fait la synthèse des niveaux d'exposition qui peuvent être attendus dans les différentes circonstances d'exposition (Inserm, 1999).

Tableau 43: gammes de concentrations ($L \geq 5 \mu\text{m}$ et $D \leq 3 \mu\text{m}$) rencontrées dans des scénarios d'exposition typiques (d'après Inserm, 1999)

| Concentrations fibres OMS (f/ml) | Environnement |
|----------------------------------|--|
| < 0,0001 | Environnement extérieur en zone rurale |
| | Bâtiments avec isolation thermique |
| 0,0001 – 0,001 | Environnement extérieur en zone urbaine |
| | Bâtiments avec des dalles de plafond ou des systèmes de ventilation contenant des FMA |
| 0,001 – 0,01 | Bâtiments avec des dalles de plafond contenant des FMA légèrement endommagés, certains systèmes de ventilation |
| 0,01 – 0,1 | Bâtiments avec des dalles de plafond contenant des FMA fortement endommagées |

Note : Tableau sans indication de méthode (a priori méthodes optiques)

A noter que certaines études décrites dans la monographie du CIRC (2002) n'ont pas été présentées dans le rapport ; ces dernières étaient jugées peu informatives, lacunaires et parfois très anciennes.

Commentaire du GT

Les valeurs dans l'environnement sont très loin des valeurs professionnelles (VLEP).

Il manque des valeurs guide pour l'environnement pour évaluer le risque.

Hormis les opérations de pose ou de retrait de matériaux à base de FMA, les concentrations maximales ont été trouvées suite à des travaux de maintenance.

Il n'y a pas d'obligation de déclaration des chantiers de retrait de LMI ni de valeur réglementaire ce qui explique les rares mesures faites sur chantier. Néanmoins les données existantes montrent des niveaux de fibres dans l'air supérieurs à ceux mesurés dans l'environnement intérieur en l'absence de travaux.

Adopter des procédures visant à réduire l'émission de fibres et à empêcher leur dispersion dans l'environnement éviterait l'apparition récurrente de symptômes de type irritatif chez des personnes voisines ou occupant les lieux après travaux.

6.2 Exposition professionnelle

6.2.1 La base de données d'exposition professionnelle aux agents chimiques COLCHIC

6.2.1.1 Présentation de la base COLCHIC

Colchic a été créée en 1986 à l'instigation de la Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (CnamTS), elle regroupe l'ensemble des mesures d'exposition effectuées par prélèvement et analyse de l'air des lieux de travail. Ces mesures sont réalisées par les huit Laboratoires Interrégionaux de Chimie (LIC) des Cram et les laboratoires spécialisés de l'INRS. Chaque intervention dans un établissement donne lieu à la constitution d'un dossier dans lequel sont codifiées les informations relatives à l'établissement et aux prélèvements effectués :

- coordonnées administratives de l'établissement (secteur d'activités, région...);
- poste de travail où ont été effectuées les mesures ;
- conditions de réalisation des prélèvements (volume, durée, méthode, type de prélèvement...);
- conditions analytiques.

Tous les résultats archivés dans cette base ont été obtenus à l'aide de techniques de prélèvement et d'analyse de l'air des lieux de travail normalisées ou élaborées par les LIC et l'INRS (Metropol).

Cette base comprend actuellement plus de 680 000 résultats pour environ 900 agents chimiques.

Les informations contenues dans COLCHIC proviennent des interventions menées pour des motifs très divers dans les établissements du régime général de la Sécurité Sociale en France.

De plus, l'INRS a mis en place une base de données spécifique aux fibres (FIBREX) accessible à tous sur son site internet (Kauffer and Vincent 2007)

Compte tenu de la diversité des motifs à l'origine des interventions, ni COLCHIC, ni Fibrex ne sauraient prétendre à une description exhaustive des situations d'exposition professionnelle en France. Malgré cette limite, ces deux bases sont un outil qui permet de repérer et de quantifier les nuisances chimiques en milieu professionnel (Vincent and Jeandel 2001).

L'annexe 15 détaille les données à partir desquelles les graphes présentés dans ce paragraphe sont issues

6.2.1.2 Les données d'exposition aux fibres de verre

Les informations présentées dans ce document concernent 1104 résultats de mesures d'exposition ou de concentration dans l'air des lieux de travail de fibres d'une longueur supérieure à 5 µm, d'une largeur inférieure à 3µm et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3. Ces mesures ont été réalisées par les laboratoires de chimie des CRAM et ceux de l'INRS dans 170 établissements, lors de 211 interventions menées de 1987 à 2007. Les résultats présentés proviennent d'analyses réalisées uniquement par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) selon la norme XP X 43-269. La nature des fibres prélevées a été déterminée sur la base de la connaissance des fibres utilisées dans l'entreprise, d'analyses complémentaires réalisées en microscopie électronique ou par l'analyse d'échantillons de matériaux fibreux. Avant février 2005, la catégorie « Fibres de verre à usage spécial » n'existait pas dans le référentiel de la base COLCHIC. Il est ainsi

probable que ces fibres qui ont fait l'objet d'une extraction particulière pour la période postérieure à 2005, étaient jusqu'à cette date incluses dans la catégorie « Fibres de verre ».

6.2.1.2.1 Analyse globale

Pour cette analyse des résultats, seuls ont été retenus les prélèvements d'ambiance ou individuels d'une durée supérieure ou égale à 30 minutes ou inférieure ou égale à 480 minutes. Après sélection il reste 1033 résultats dont la durée moyenne est de 159 minutes pour une durée médiane de 137 min. Les statistiques pour l'ensemble des résultats et par type de prélèvement (QTI pour quantitatif individuel et QTA pour quantitatif d'ambiance) sont indiqués sur le graphique ci-dessous.

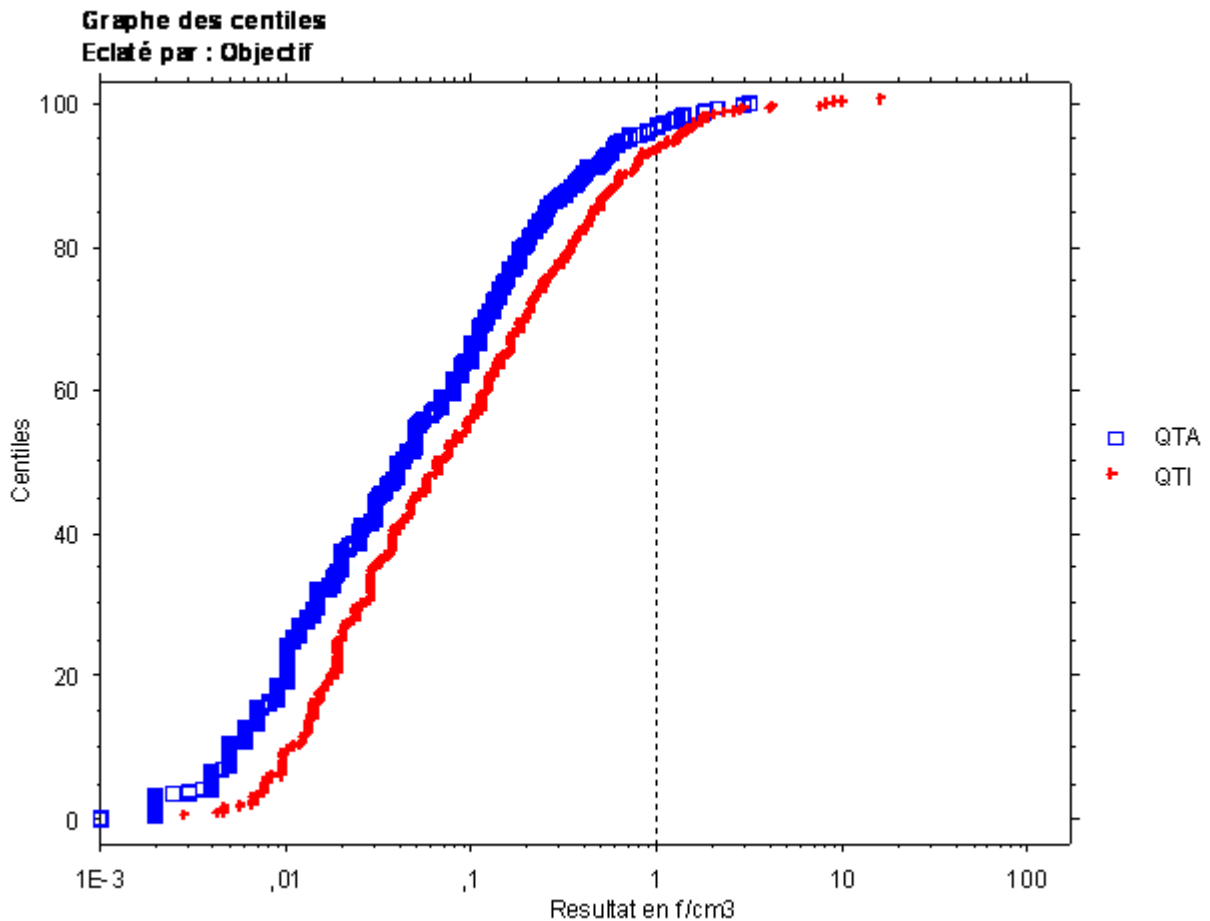


Figure 59: fibres de verre : courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI).

Globalement la VLEP- 8h de 1f/cm3 est dépassée dans 7,3 % des cas pour les prélèvements individuels.

6.2.1.2.2 Evolution des expositions au cours du temps

L'analyse des résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1987-2007 met en évidence une décroissance significative ($p < 0,001$) des expositions aux fibres de verre.

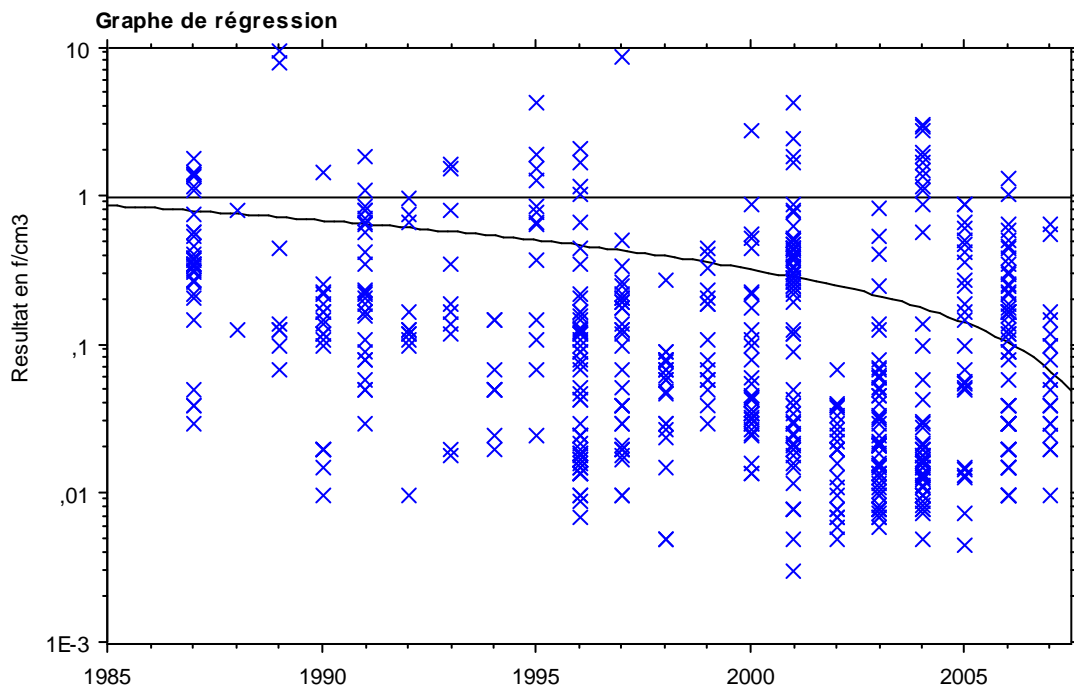


Figure 60: fibres de verre, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1985 - 2007

6.2.1.2.3 Les secteurs d'activités

Les mesures d'exposition aux fibres ont été réalisées dans des établissements appartenant à 88 secteurs d'activités définis par leur code NAF (Cf annexes). La majorité des mesures provient du secteur de la fabrication de pièces techniques en matières plastiques où les fibres mesurées dans l'air des lieux de travail proviennent probablement de la mise en œuvre de matériaux de renforcement : nappe, mat de verre... La liste des secteurs d'activités et la représentation sous forme de boîtes (Graphe en boîte*22), permettent d'apprécier la diversité des secteurs utilisateurs ainsi que la variabilité des expositions.

²² *Graphique en boîtes : ce type de graphique permet de représenter les percentiles 10, 25, 50 (médiane), 75 et 90 de la distribution d'une variable. Les valeurs situées au delà des percentiles 10 et 90 sont représentées par des points. L'étrangement de la boîte correspond à l'intervalle de confiance à 95 % de la médiane. Lorsque le nombre de valeurs est faible, l'intervalle de confiance se trouve élargi, ce qui conduit à une extension des bords supérieurs et inférieurs de la boîte.²²

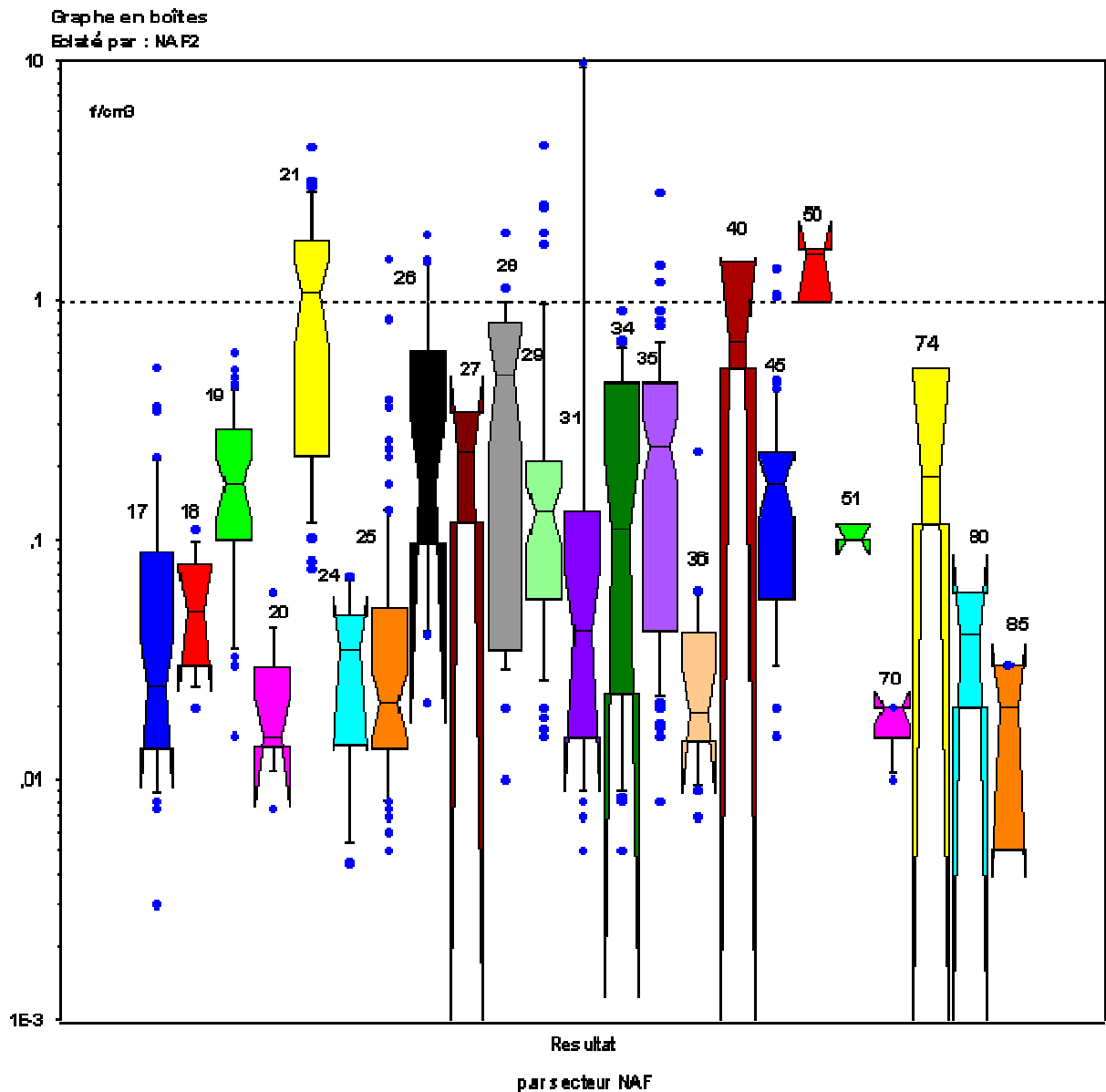


Figure 61: mesures d'exposition aux fibres de verre par secteur d'activité

Sur la figure 61 les boites sont présentées dans l'ordre ci-dessous avec les classes NAF :

- [17](#) Industrie textile
- [18](#) Industrie de l'habillement et des fourrures
- [19](#) Industrie du cuir et de la chaussure
- [20](#) Travail du bois et fabrication d'articles en bois
- [21](#) Industrie du papier et du carton
- [24](#) Industrie chimique
- [25](#) Industrie du caoutchouc et des plastiques
- [26](#) Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques
- [27](#) Métallurgie

- [28](#) Travail des métaux
- [29](#) Fabrication de machines et d'équipements
- [31](#) Fabrication de machines et appareils électriques
- [34](#) Industrie automobile
- [35](#) Fabrication d'autres matériels de transport
- [36](#) Fabrication de meubles ; industries diverses
- [40](#) Production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur
- [45](#) Construction
- [50](#) Commerce et réparation automobile
- [51](#) Commerce de gros et intermédiaires du commerce
- [70](#) Activités immobilières
- [74](#) Services fournis principalement aux entreprises
- [80](#) Education
- [85](#) Santé et action sociale

6.3

6.3.1.1.1 Les métiers exposés

A partir de 2002, les informations archivées dans COLCHIC permettent d'identifier le type de métier exposé c'est-à-dire plus précisément les niveaux d'exposition qui y sont associés. La liste ci dessous correspond aux métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de verre. Les métiers sont répertoriés suivant le code ROME de l'ANPE.

Tableau 44: métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de verre

| Code | Libellé | Nb résultats |
|-------|---|--------------|
| 44111 | Agent d'usinage des métaux | 57 |
| 45113 | Opérateur sur machines de formage des matières plastiques et du caoutchouc | 46 |
| 46115 | Opérateur d'atelier de coupe des industries des matériaux souples | 39 |
| 44131 | Agent de montage-assemblage de la construction mécanique | 37 |
| 46125 | Opérateur d'assemblage-montage des industries de l'habillement et autres fabrication à base d'étoffes | 16 |
| 45322 | Opérateur de production de papier-carton | 14 |
| 44143 | Stratifieur-mouliste | 12 |
| 44112 | Agent de découpage des métaux | 7 |
| 52211 | Technicien de fabrication de la construction mécanique et du travail des métaux | 7 |
| 43311 | Agent du stockage et de la répartition de marchandises | 5 |
| 44134 | Tuyauteur industriel | 5 |
| 46131 | Conducteur de machines d'ennoblissement textile | 5 |
| 45411 | Opérateur sur machines de finition, contrôle et conditionnement | 5 |
| 45212 | Opérateur de production des métaux | 4 |
| 45232 | Opérateur de production de céramique et de matériaux de construction | 4 |
| 46123 | Opérateur de tannerie-mégisserie | 4 |
| 45413 | Opérateur de laboratoire des industries de process | 4 |
| 12121 | Agent administratif/agente administrative d'entreprise | 3 |
| 52312 | Installateur-maintenicien en systèmes automatisés | 3 |
| 45321 | Opérateur de production des pâtes à papier et à carton | 3 |
| 22122 | Enseignant d'enseignement technique (agricole, professionnel, technologique) | 2 |
| 46322 | Façonneur bois et matériaux associés (production de série) | 2 |
| 46323 | Monteur d'ouvrages en bois et matériaux associés (production de série) | 2 |
| 46321 | Conducteur de machines de fabrication des industries de l'ameublement et du bois (& matériaux associés) | 2 |
| 43312 | Agent de manipulation et de déplacement des charges | 2 |
| 44313 | Régleur | 2 |
| 44135 | Ajusteur mécanicien | 2 |
| 44121 | Opérateur-régleur sur machine-outil | 1 |
| 52212 | Technicien qualité de la construction mécanique et du travail des métaux | 1 |

6.3.1.1.2 Les laines minérales et matériaux à base de filament continu

La technique d'analyse employée pour le comptage des fibres prend en compte des objets aux caractéristiques dimensionnelles fixées : diamètre $<3\mu\text{m}$ et largeur $>5\mu\text{m}$ et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3. Ces objets peuvent correspondre à des fibres issues de laines minérales et de forme cylindrique ou issues de matériaux élaborés à partir de filaments continus tels que les tissus de verre utilisés pour renforcer les matériaux composites. Dans ce dernier cas, il s'agit probablement d'éclats provenant des matériaux usinés. Dans ce cas, elles proviennent soit de la résine, soit des filaments continus de verre. Cette double nature des fibres a déjà été mise en évidence lors d'une étude sur l'usage des matériaux stratifiés où 30 % des fibres comptées provenaient de la résine et non de la fibre. Il est probable que la nature des matériaux mis en œuvre- laine ou filament- influe sur les niveaux d'exposition. Les informations de la base COLCHIC ne permettent pas de faire de distinction entre l'exposition liée aux laines minérales ou de matériaux constitués de filaments continus. Une analyse complémentaire des données à été menée en considérant la nature des travaux réalisés et l'utilisation pratiquement certaine de laines de verre ou de filaments continus.

Trois catégories de travaux ont été considérées (Kauffer, Vigneron, and Veissière S 1990):

- les travaux d'isolation de bâtiments en relation avec la mise en œuvre de laines minérales (105 résultats de mesure d'exposition ou d'ambiance).
- les opérations de fabrication et d'usinage de matériaux composite en relation avec l'emploi de filaments continus comme matrice de renfort (287 résultats de mesures d'exposition ou d'ambiance).

L'étude de ces deux séries de résultats, montre l'existence de deux ensembles de résultats disjoints et met en évidence des niveaux d'exposition nettement supérieurs dans le cas d'une mise en œuvre supposée de laines minérales (Voir graphes et tableau ci-dessous fig 62 -64)

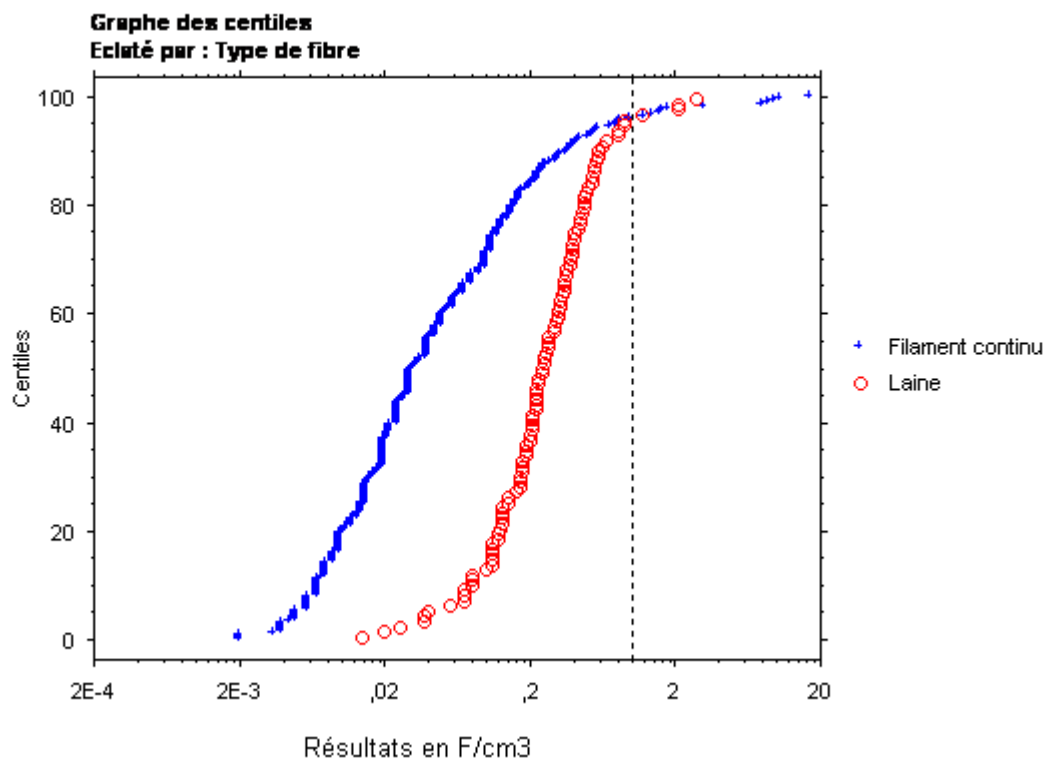


Figure 62: dictinction de l'exposition entre laine de verre et filaments de verre continus

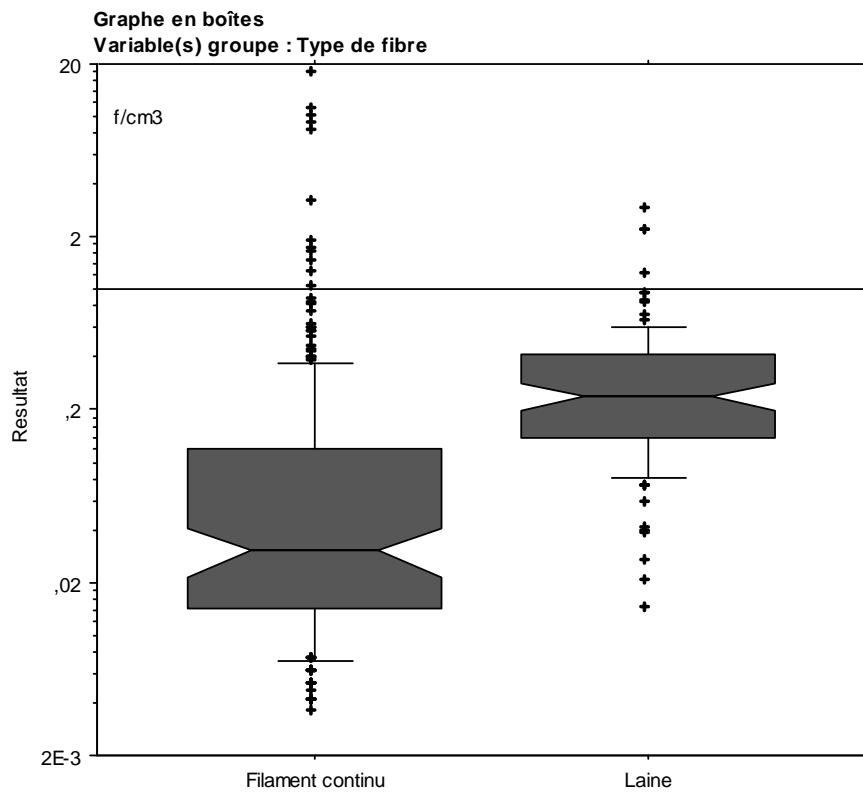


Figure 63: graphe en boîtes: distinction de l'exposition entre laine de verre et filaments de verre continus

Une analyse par poste de travail permet de différencier l'exposition avec une plus faible exposition lors de la fabrication des matériaux composites que lors de leur usinage. Pour les travaux d'isolation l'exposition est plus importante mais avec une variabilité modérée.

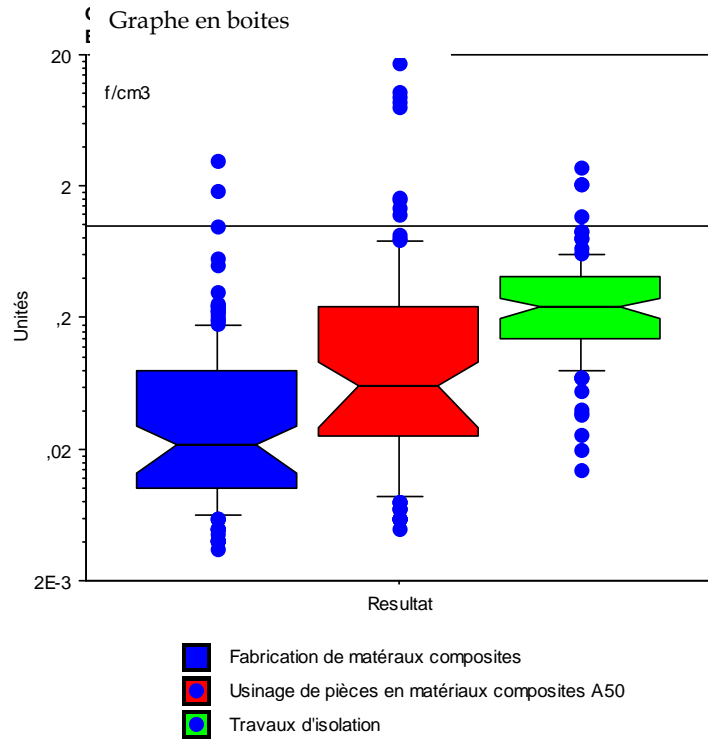


Figure 64: analyse par poste de travail de l'exposition aux laines de verre et filaments continus de verre

6.3.1.2 Les données d'exposition aux fibres de roche

Les informations présentées dans ce document concernent 576 résultats de mesures d'exposition ou de concentration dans l'air des lieux de travail de fibres d'une longueur supérieure à 5 µm, d'une largeur inférieure à 3µm et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3. Ces mesures ont été réalisées par les laboratoires de chimie des CRAM et ceux de l'INRS dans 53 établissements, lors de 66 interventions menées de 1987 à 2007.

Les résultats présentés proviennent d'analyses réalisées uniquement par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) selon la norme XP X 43-269. La nature des fibres prélevées a été déterminée sur la base de la connaissance des fibres utilisées dans l'entreprise, d'analyses complémentaires réalisées en microscopie électronique ou par l'analyse d'échantillons de matériaux fibreux.

6.3.1.2.1 Analyse globale

Pour cette analyse des résultats, seuls ont été retenus les prélèvements d'ambiance ou individuels d'une durée supérieure ou égale à 30 minutes ou inférieure ou égale à 480 minutes. Après sélection il reste 563 résultats dont la durée moyenne est de 160 minutes pour une durée médiane de 141 minutes. Les statistiques pour l'ensemble des résultats et par type de prélèvement (QTI pour individuel et QTA pour ambiance) sont indiqués dans le graphe ci-dessous.

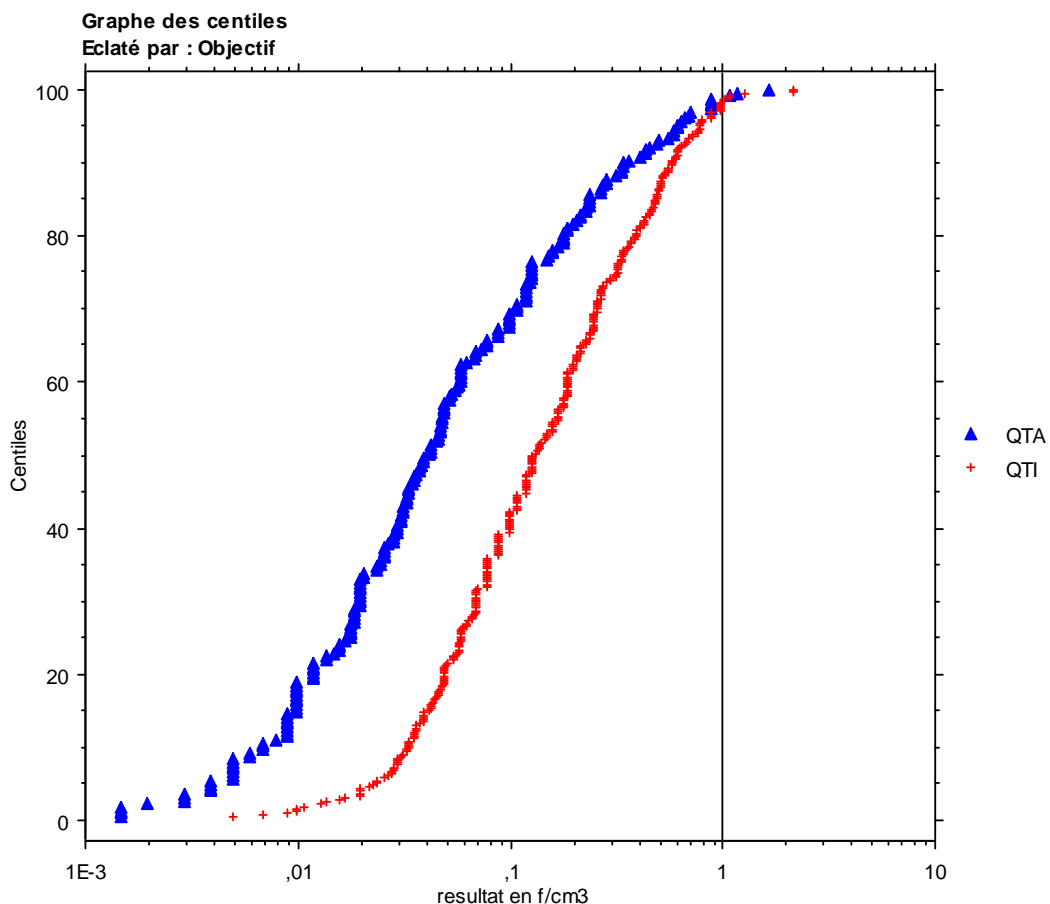


Figure 65: fibres de roche, courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI)

Globalement la VLEP- 8h de $1f/cm^3$ est dépassée dans 3 % des cas pour les prélèvements individuels.

6.3.1.2.2 Evolution des expositions au cours du temps

L'analyse des résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1987-2007 ne met pas en évidence d'évolution significative ($p=0,236$) des expositions aux fibres de roche.

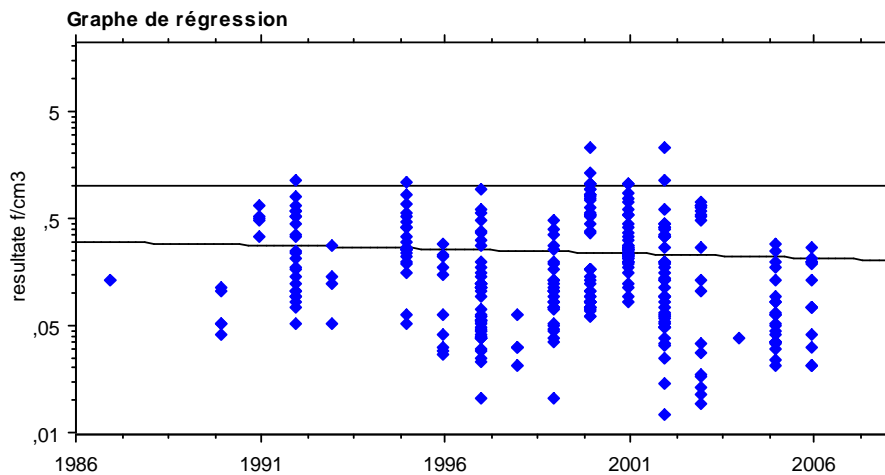


Figure 66: fibres de roche, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1988 - 2006

6.3.1.2.3 Les secteurs d'activités

Les mesures d'exposition aux fibres ont été réalisées dans des établissements appartenant à 35 secteurs d'activités définis par la nomenclature des activités françaises de l'INSEE (NAF). La majorité des mesures provient du secteur de la fabrication des laines de roche (268C) et de secteurs utilisant ce type de laines minérales très probablement pour des travaux d'isolation.

Liste des secteurs d'activités ayant fait l'objet de mesures d'exposition aux fibres de roche de 1987 à 2007 se trouve en annexe

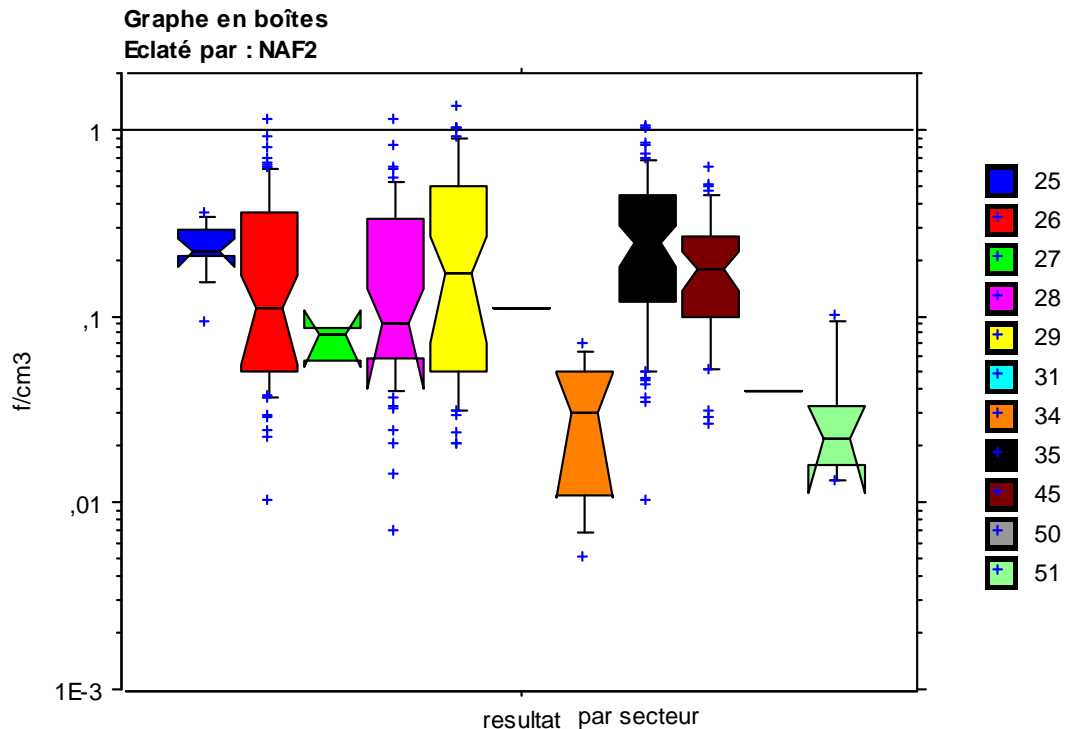


Figure 67: fibres de roche, Secteurs d'activité où des mesures d'exposition ont été effectuées

Libellé des classes NAF

- 25 Industrie du caoutchouc et des plastiques
- 26 Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques
- 27 Métallurgie
- 28 Travail des métaux
- 29 Fabrication de machines et d'équipements
- 31 Fabrication de machines et appareils électriques
- 34 Industrie automobile
- 35 Fabrication d'autres matériels de transport
- 45 Construction
- 50 Commerce et réparation automobile
- 51 Commerce de gros et intermédiaires du commerce

6.3.1.2.4 Les métiers exposés

La liste ci dessous correspond aux métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de roche. Les métiers sont répertoriés suivant le code ROME de l'ANPE .

| Code Libellé | Nb résultats |
|--|--------------|
| 42124 Ouvrier de l'étanchéité et de l'isolation | 20 |
| 45232 Opérateur de production de céramique et de matériaux de construction | 17 |
| 44131 Agent de montage-assemblage de la construction mécanique | 11 |
| 45231 Pilote d'installation de production | 11 |

| | |
|---|---|
| cimentière | |
| 45111 Pilote d'installation des industries chimiques et de production d'énergie | 5 |
| 44111 Agent d'usinage des métaux | 4 |
| 53131 Cadre technique de l'environnement | 4 |
| 44212 Interconnecteur en matériel électrique et électromécanique | 3 |
| 46115 Opérateur d'atelier de coupe des industries des matériaux souples | 3 |
| 43312 Agent de manipulation et de déplacement des charges | 2 |
| 46123 Opérateur de tannerie-mégisserie | 2 |
| 46116 Apprêteur des industries des matériaux souples | 1 |

6.3.1.3 Les données d'exposition aux fibres de laitier

Les informations présentées dans ce document concernent 94 résultats de mesures d'exposition ou de concentration dans l'air des lieux de travail de fibres d'une longueur supérieure à 5 µm, d'une largeur inférieure à 3µm et dont le rapport longueur sur largeur est supérieur à 3. Ces mesures ont été réalisées par les laboratoires de chimie des CRAM et ceux de l'INRS dans 7 établissements, lors de 15 interventions menées de 1988 à 2006. Les résultats présentés proviennent d'analyses réalisées uniquement par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) selon la norme XP X 43-269. La nature des fibres prélevées a été déterminée sur la base de la connaissance des fibres utilisées dans l'entreprise, d'analyses complémentaires réalisées en microscopie électronique ou par l'analyse d'échantillons de matériaux fibreux.

6.3.1.3.1 *Analyse globale*

Pour cette analyse des résultats, seuls ont été retenus les prélèvements d'ambiance ou individuels d'une durée supérieure ou égale à 30 minutes ou inférieure ou égale à 480 minutes. Après sélection il reste 94 résultats dont la durée moyenne est de 119 minutes pour une durée médiane de 122 minutes. Les statistiques pour l'ensemble des résultats et par type de prélèvement (QTI pour individuel et QTA pour ambiance) sont indiqués dans le tableau en annexe 2.

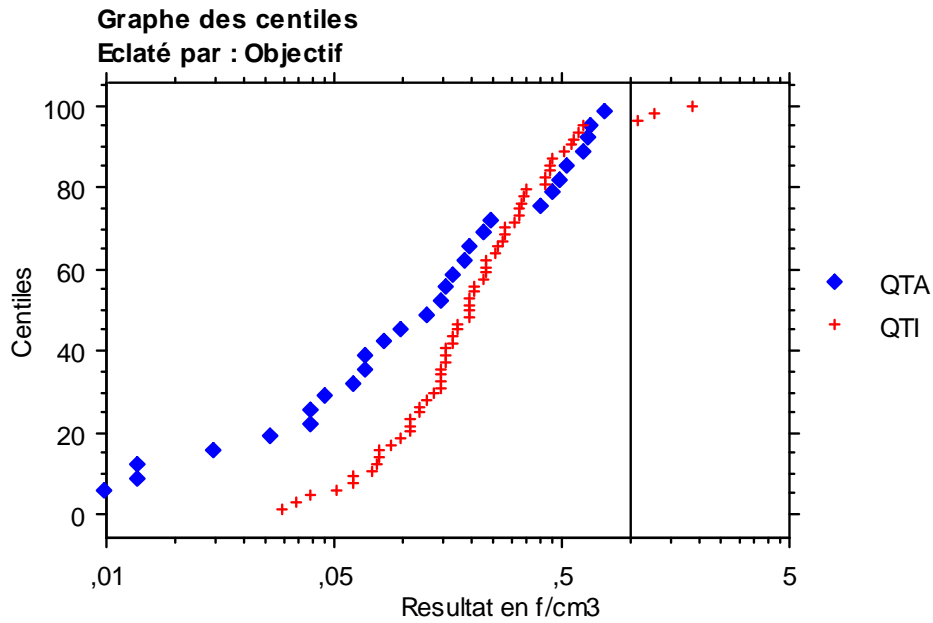


Figure 68: fibres de laitier, Courbe des fréquences cumulées pour les prélèvements d'ambiance (QTA) et individuels (QTI)

Globalement la VLEP- 8h de 1f/cm³ est dépassée dans 3,4 % des cas pour les prélèvements individuels.

6.3.1.3.2 Evolution des expositions au cours du temps

L'analyse des résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1988 - 2006 ne pas met en évidence de décroissance significative (p=0,167) des expositions aux fibres de laitier.

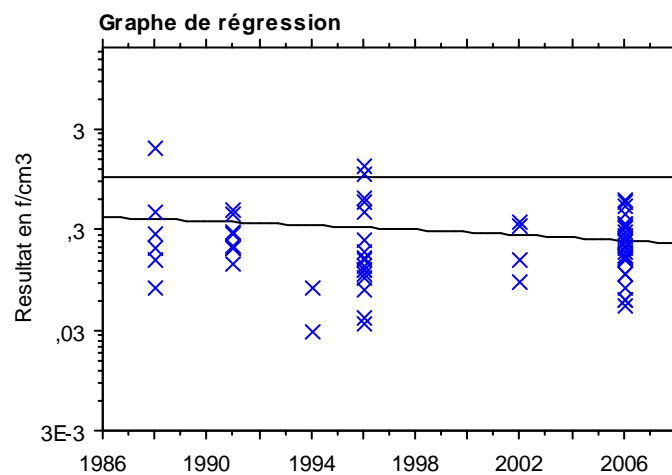


Figure 69: fibres de laitier, résultats de prélèvements individuels au cours du temps sur la période 1986-2006

6.3.1.3.3 Les secteurs d'activités

Les mesures d'exposition aux fibres ont été réalisées dans des établissements appartenant à 7 secteurs d'activités définis par la nomenclature des activités françaises de l'INSEE (NAF). La majorité des mesures provient des secteurs de la fabrication des laines minérales (268C) et des fibres de verre (261G). Après vérification il s'avère que le secteur d'activités de la fabrication des fibres de verre peut également produire d'autres fibres dont celles de laitier.

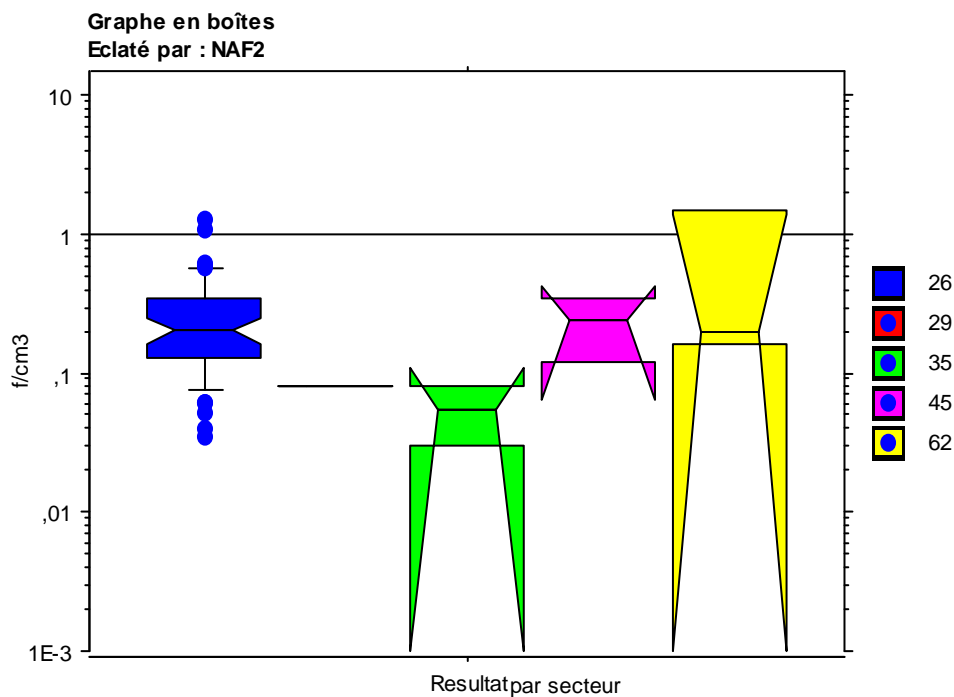


Figure 70: fibres de laitier, secteurs d'activités ayant fait l'objet de mesures d'exposition de 1987 à 2007

Liste des classes NAF

- 26 Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques
- 29 Fabrication de machines et d'équipements
- 35 Fabrication d'autres matériels de transport
- 45 Construction

6.3.1.3.4 Les métiers exposés

La liste ci dessous correspond aux métiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de laitier. Les métiers sont répertoriés suivant le code ROME de l'ANPE .

Tableau 45: metiers ayant fait l'objet d'une mesure d'exposition aux fibres de laitier

| Code Libellé | Nb résultats |
|---|--------------|
| 45411 Opérateur sur machines de finition, contrôle et conditionnement | 18 |

| | |
|---|---|
| 45222 Opérateur de formage du verre | 8 |
| 11211 Nettoyeur/nettoyeuse de locaux et de surfaces | 3 |

6.3.1.4 Évolution des populations de fibres au cours du temps

Lors des comptages de fibres issus de mesures d'exposition par la technique MOCP, deux types de fibres sont généralement prises en compte :

-les fibres de diamètre inférieur à 3 µm et de longueur supérieure à 5 µm ($d < 3\mu\text{m}$; $L > 5\mu\text{m}$), c'est ce type de type de fibres qui est pris en compte pour les comparaisons de niveaux d'exposition à la VLEP ;

- les fibres de diamètre supérieur à 3 µm et de longueur supérieure à 5 µm ($d > 3\mu\text{m}$; $L > 5\mu\text{m}$).

L'évolution des conditions de production et des performances des laines minérales peut se traduire par une modification du diamètre nominal moyen et des proportions au sein du matériau des fibres de diamètre inférieur à 3 µm et celles de diamètre supérieur à 3 µm.

Bien qu'il n'existe pas de corrélation établie entre les distributions dimensionnelles des fibres constituant le matériau et celles en suspension, une exploitation complémentaire des données COLCHIC a été menée pour vérifier l'influence d'une évolution possible au cours du temps des diamètres nominaux des fibres sur la répartition des deux populations de fibres en suspension dans l'air des lieux de travail.

Pour réaliser cette analyse, les mesures d'exposition comprenant un comptage des deux types de fibres ont été sélectionnées. Les mesures d'exposition comprenant un résultat exprimé par rapport à une limite de détection n'ont pas été prises en compte. Pour chaque couple de résultats d'une mesure d'exposition le rapport (R) des concentrations en fibres a été calculé de la manière suivante :

$$R = \frac{\text{Concentration } f / \text{cm}^3 (d > 3\mu\text{m}; L > 5\mu\text{m})}{\text{Concentration } f / \text{cm}^3 (d < 3\mu\text{m}; L > 5\mu\text{m})}$$

L'analyse statistique été menée pour les fibres de verre et les fibres de roche.

6.3.1.4.1 *Distributions des valeurs du rapport R pour les fibres de verre : filament continu et laine*

L'ensemble des résultats de fibres de verre a tout d'abord été éclaté en deux sous ensembles, tel qu'exposé précédemment, en fonction de la nature des postes de travail. Les données disponibles correspondent probablement à des expositions aux laines minérales pour l'un des sous ensembles, alors que pour l'autre les expositions sont liées à la mise en oeuvre de matériaux à base de filaments continus lors de la production et l'usinage de composites.

Les résultats correspondants figurent dans les tableaux en annexe et figures suivantes.

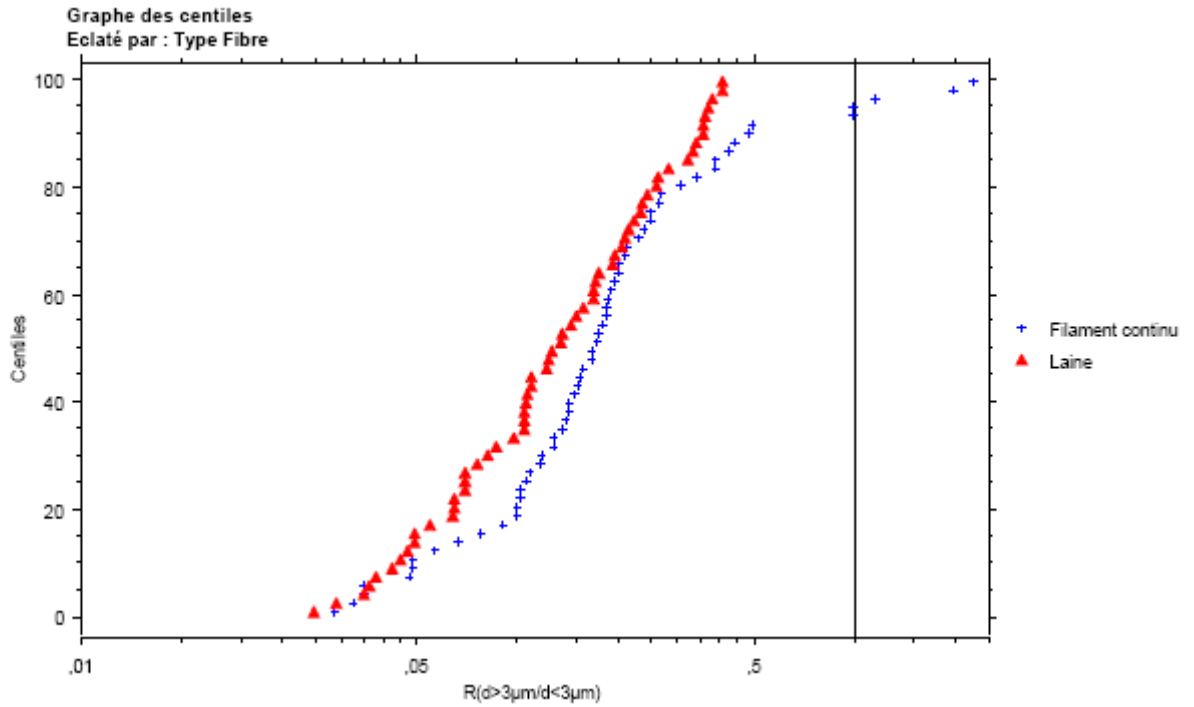


Figure 71: fréquence cumulée des rapports enregistrés entre 1998 et 2006

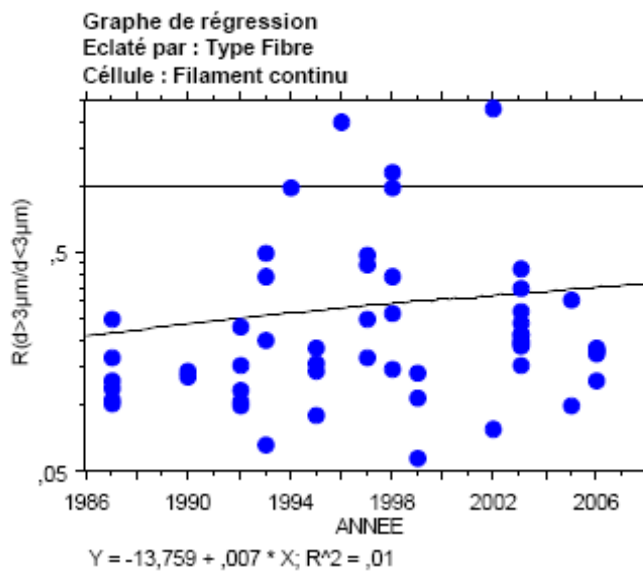


Figure 72: évolution au cours du temps du rapport R pour les filaments continus

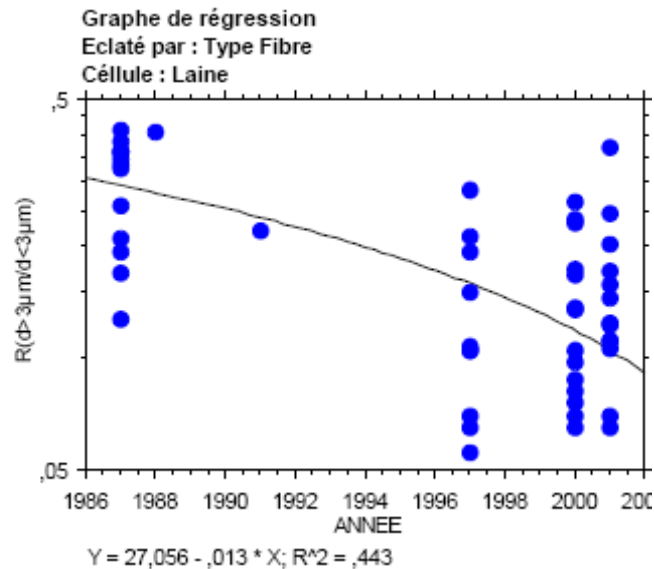


Figure 73: évolution au cours du temps du rapport R pour les laines minérales

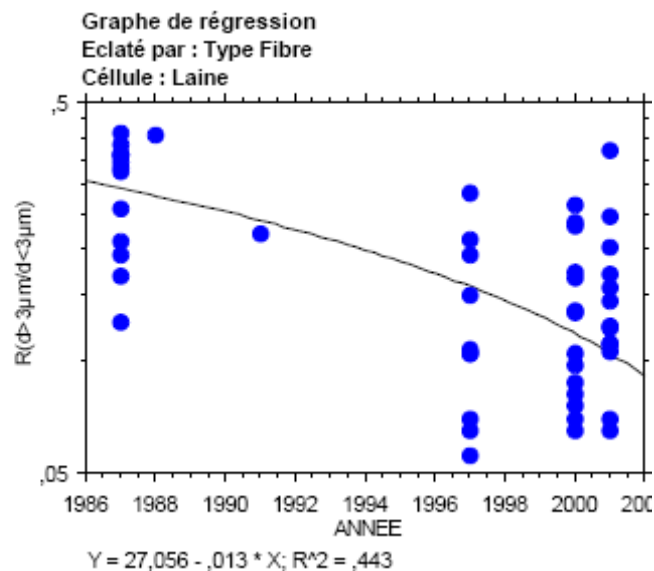


Figure 74: évolution au cours du temps du rapport R pour les laines minérales

On observe une évolution significative ($p < 0,0001$) pour le rapport des populations de fibres reflétant une exposition aux laines minérales de verre, ce qui n'est pas le cas pour les fibres employées pour la fabrication des composites ($p = 0,43$). En conclusion, la proportion de fibres de laines minérales de verre ayant un diamètre inférieur à 3 microns a augmenté significativement au cours du temps.

6.3.1.4.2 Fibres de roche

L'analyse menée sur les couples de résultats de mesure d'exposition aux fibres de roche figure ci dessous.

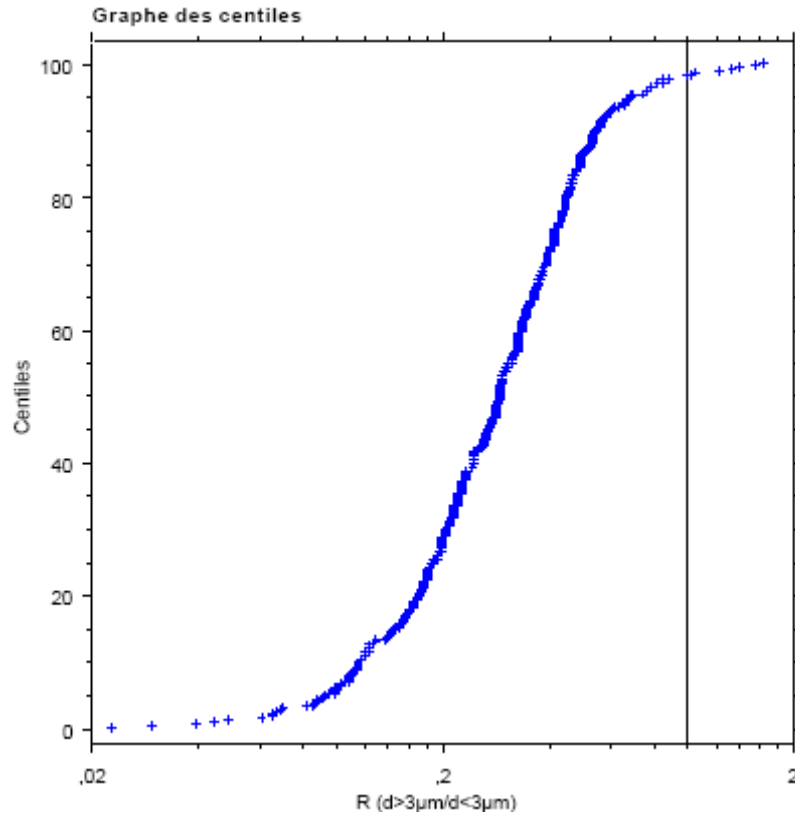


Figure 75: distribution des valeurs du rapport R pour les fibres de roche

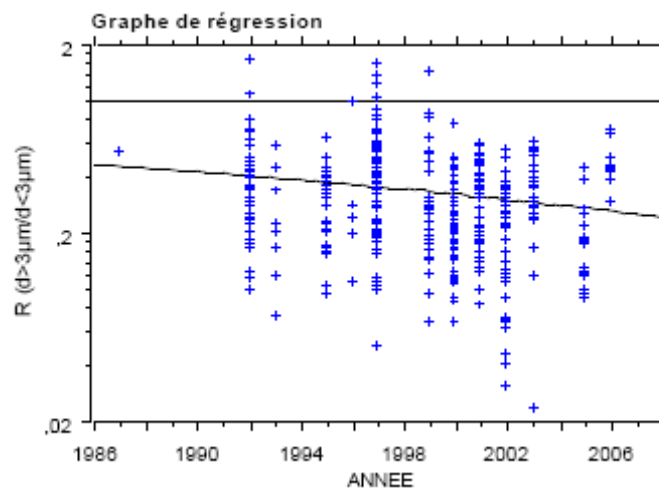


Figure 76: graphe de régression pour l'évolution des laines minérales au cours du temps

Pour les fibres de roche, on observe également une évolution significative ($p < 0,0005$) pour le rapport des populations de fibres. En conclusion, la proportion de fibres de laines minérales de roche ayant un diamètre inférieur à 3 microns a augmentée significativement au cours du temps.

6.3.1.5 Conclusions sur les données de la base Colchic

L'exploitation des données de la base COLCHIC met tout d'abord en évidence une prédominance des résultats de mesures d'exposition aux fibres de verre, comparées à celles enregistrées pour les laines de roche et de laitier. Cette situation traduit probablement de manière indirecte le marché de l'utilisation des différentes fibres.

En référence à la VLEP-8 heures de 1fibre/cm³, la proportion de résultats supérieurs à cette valeur est faible et varie de 7,3 % pour les fibres de verre à 3% pour les fibres de roche. L'exposition aux fibres de verre concerne avant tout le secteur de la fabrication et de l'usinage des matériaux composites. Un examen complémentaire des données d'exposition aux fibres de verre met en évidence un niveau d'exposition plus important pour les travaux d'isolation comparés aux travaux d'usinage et de fabrication de matériaux composites. Une décroissance significative pour les fibres de verre, non significative pour les autres, des niveaux d'exposition au cours du temps a été observée.

Par ailleurs, l'analyse des résultats des différentes populations de fibres comptées par MOCP, met en évidence une augmentation de la proportion de fibres fines en suspension dans l'air au cours du temps. Cette situation est probablement liée à une modification des caractéristiques dimensionnelles des laines minérales au cours du temps.

6.3.2 La base de données EVALUTIL

6.3.2.1 Présentation

EVALUTIL est une base de données accessible sur Internet et constitue un outil d'aide à l'évaluation des expositions professionnelles aux fibres d'amiante et aux FMA. Dans le cadre d'EVALUTIL, les FMA ont été définies par les laines minérales (verre, roche, laitier), les FCR, les filaments continus de verre et les fibres de verre à usage spécial (ou Microfibres®).

En raison des interrogations concernant les risques professionnels liés à l'inhalation de ces fibres, la documentation des niveaux d'exposition est devenue indispensable afin :

- d'assurer la mise en œuvre des mesures préventives d'hygiène industrielle et de la surveillance médicale des travailleurs exposés ;
- et de progresser dans la connaissance des effets d'inhalation de ces différents types de fibres sur la santé, grâce aux études épidémiologiques.

6.3.2.2 Intérêts et limites d'EVALUTIL

EVALUTIL permet de rassembler dans différentes bases de données des informations pertinentes pour l'évaluation des expositions professionnelles des utilisateurs et producteurs de matériaux contenant de l'amiante ou des FMA. Ces bases sont disponibles sur Internet et peuvent être consultées selon plusieurs critères de recherche (source, secteur d'activité, profession, produit...). Cependant, les données réunies dans EVALUTIL ne couvrent pas tous les secteurs d'activité français et présentent certaines limites du point de vue de la caractérisation des expositions professionnelles qui sera envisagée.

6.3.2.2.1 *Hétérogénéité des données*

Les informations contenues dans les bases documentaires sont extraites de sources diverses : rapports d'hygiénistes industriels chargés du contrôle des niveaux d'exposition et du respect des valeurs limites réglementaires, monographies et études épidémiologiques qui rapportent des données métrologiques.

Dans certaines sources, des résultats de plusieurs prélèvements ayant en commun un secteur, une profession ou une famille de produits sont regroupés, et dans d'autres sont

présentées de petites séries de prélèvements relatifs à des situations très spécifiques. De plus, la présentation des métrologies diffère d'une source à l'autre : certains auteurs affichent les résultats de chaque prélèvement, d'autres indiquent les moyennes et/ou les valeurs extrêmes d'une série de prélèvements. On note également que des renseignements utiles à l'interprétation tels que les conditions de ventilation, l'outillage utilisé, le degré d'usure du matériau, la distance de la source et le type de prélèvements, ne sont pas systématiquement mentionnés. Enfin, dans certaines sources, les méthodes de prélèvement et de comptage ne sont pas précisées ou ne correspondent pas aux méthodes de référence.

Cette disparité dans le contenu et la présentation des informations constitue un obstacle au traitement statistique des données. Par conséquent, EVALUTIL ne présente pas de calculs de valeur "moyenne" du niveau d'exposition par emploi ou par geste professionnel.

6.3.2.2 Représentativité des données

Les informations ont été regroupées en "documents" dans les bases de données. La question du caractère représentatif d'un document ou d'un ensemble de documents extraits des bases de données se pose lorsque l'on envisage de les utiliser pour évaluer des expositions professionnelles en hygiène industrielle, en épidémiologie ou dans les domaines de la surveillance et de la réparation des maladies professionnelles.

La validité des mesures instrumentales et la précision des renseignements sur les circonstances d'exposition, évaluées par l'indice de qualité qui accompagne chaque document, sont indispensables pour interpréter une métrologie associée à une situation professionnelle donnée. Dans la base Amiante, près de 80 % des documents ont été évalués de très bonne qualité, près de 90 % dans la base FMA. Cependant, la variabilité inter et intra individuelle des niveaux d'exposition pour un même geste professionnel, bien connue en hygiène industrielle, rend difficile l'appréciation du caractère représentatif d'un document. La moyenne d'une série de résultats métrologiques, tous réalisés dans les mêmes conditions, est en principe plus représentative qu'un résultat isolé.

Bien que les informations apportées par EVALUTIL concernent des situations spécifiques, elles apportent des indications très utiles et permettent d'alerter sur le risque lié à certaines situations de travail. EVALUTIL ne peut cependant pas se substituer à l'analyse de chaque situation particulière par les professionnels.

L'intérêt et les limites d'EVALUTIL sont présentées de manière explicite dans le rapport InVS intitulé « Base de données EVALUTIL – Evaluation de l'exposition professionnelle aux fibres » (Rolland et al. 2005).

6.3.2.3 Résultats

Les synthèses de données d'exposition proposées ont été recueillies à partir de la littérature scientifique internationale et des fiches de prélèvements envoyées par les Cram.

Pour chaque type de fibre (laine de verre, de roche et de laitier, et filaments continus de verre), ont été extraites les données concernant les secteurs de la production et de la transformation, et, quand cela était possible, un secteur utilisateur.

Les secteurs ou activités du site contrôlé sont codifiés selon la nomenclature des activités économiques des communautés européennes (Nace Révision 1. Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Paris.).

Les synthèses sont présentées de la façon suivante :

Un graphique, représentant les niveaux d'exposition compilés pour un secteur de production / transformation ou d'utilisation. Les concentrations moyennes (en F/ml) sont découpées selon trois classes d'exposition :

- < 0,1 f/ml ;
- 0,1 à 1 f/ml ;
- 1 f/ml

Figurent en ordonnée les concentrations en fibres dans l'air, et en abscisse le nombre de métrologies par classe d'exposition. Une métrologie désigne un ensemble de données chiffrées issues d'un document (concentrations de fibres) et exprimé en f/ml, qui comprend au mieux une valeur minimale, une valeur maximale et une moyenne. Une métrologie rend ainsi compte de résultats d'un ou plusieurs prélèvements.

Afin d'améliorer la représentativité des données, seules les métrologies issues de prélèvements individuels et comportant au minimum une concentration moyenne ont été extraites.

Un tableau apportant des informations complémentaires sur les niveaux d'exposition, selon les informations disponibles dans les documents :

- la cote du document (référence Evalutil du document sur la page de résultat de l'interrogation) ;
- l'auteur et l'année de la publication ;
- la situation de travail qui, au mieux, renseigne sur la profession exacte de l'opérateur, et son activité exposante au moment du mesurage ;
- le nombre de prélèvements ;
- la durée moyenne du ou des prélèvements ;
- la concentration moyenne du ou des prélèvements ainsi que les valeurs minimales et maximales quand elles sont disponibles.

Un document peut contenir plusieurs métrologies, notamment lorsque différents types de prélèvements sont effectués pour la même situation d'exposition, ou lorsque les fibres sont comptées selon des méthodes différentes. Par conséquent, la même situation de travail peut être documentée plusieurs fois dans le même tableau.

Pour de plus amples informations, les données d'exposition aux laines minérales et aux filaments continus de verre compilées dans les synthèses pourront faire l'objet d'une interrogation sur la base mise en ligne sur Internet à l'adresse <http://etudes.isped.u-bordeaux2.fr> (combinaison des critères auteur et activité du site contrôlé et affinement de la recherche par vérification de la cote dans l'affichage des documents).

Le tableau détaillant l'ensemble des données des graphiques fait l'objet de l'annexe 16. Elles sont à compléter en allant regarder sur le site Evalutil.

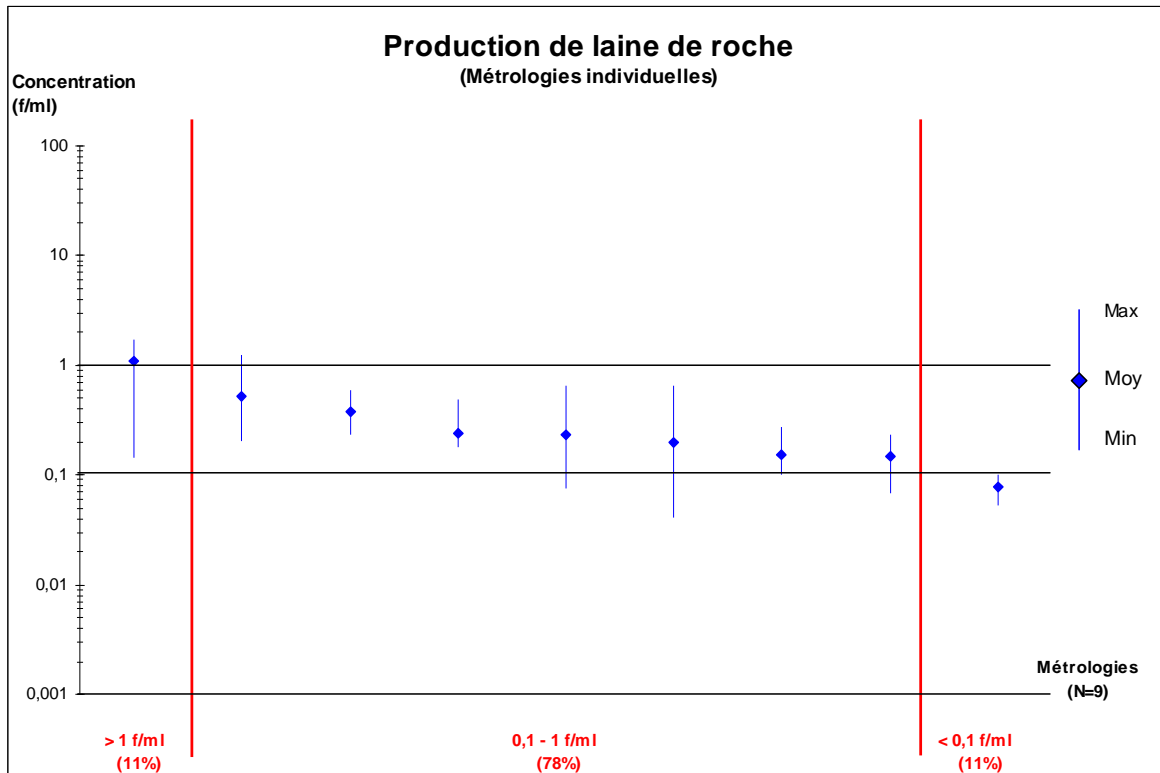


Figure 77 : concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de roche (métrologies individuelles)

Code Nace : 2682 - Fabrication de produits minéraux non métalliques n.c.a

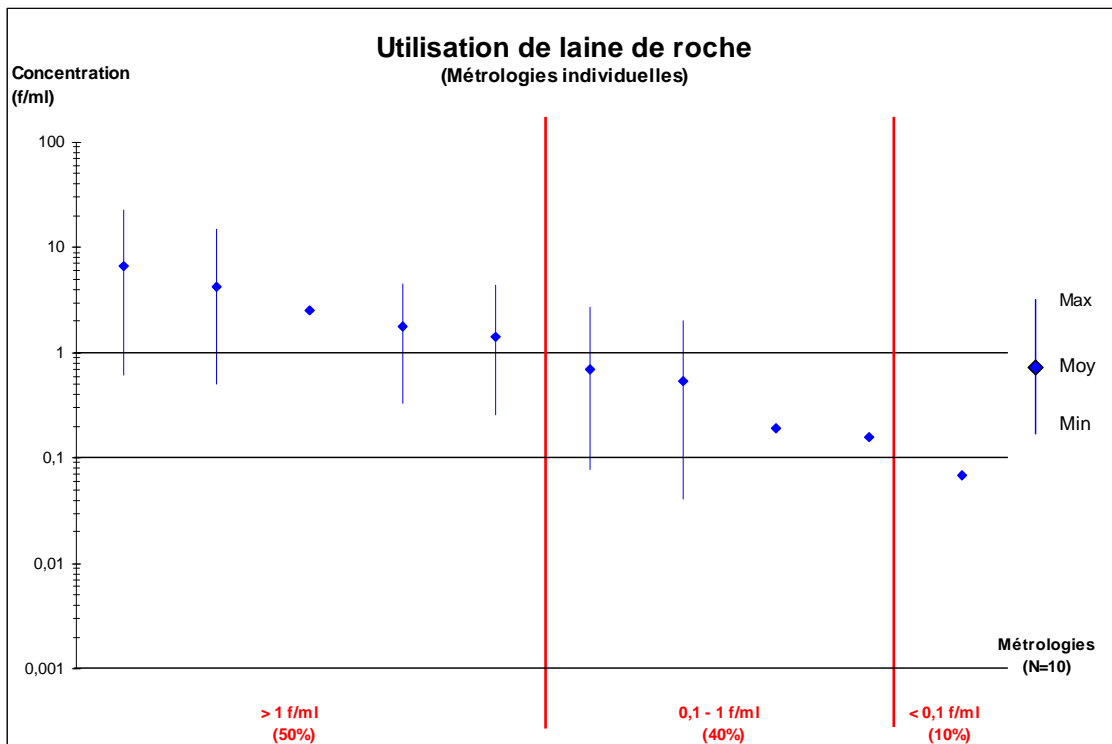


Figure 78 : concentrations observées dans le secteur du BTP lors de l'utilisation de laine de roche (métrologies individuelles)

Code Nace : 45** - Travaux de construction

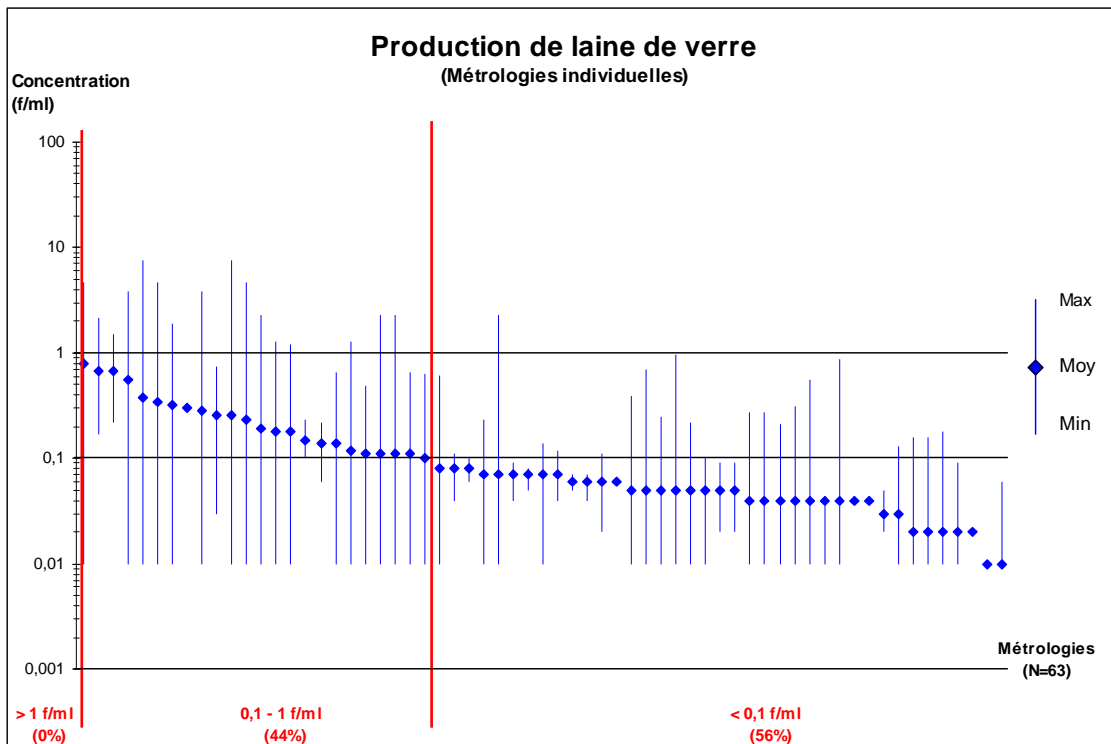


Figure 79 : concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de verre (métrologies individuelles)

Code Nace : 2614 - Fabrication de fibres de verre

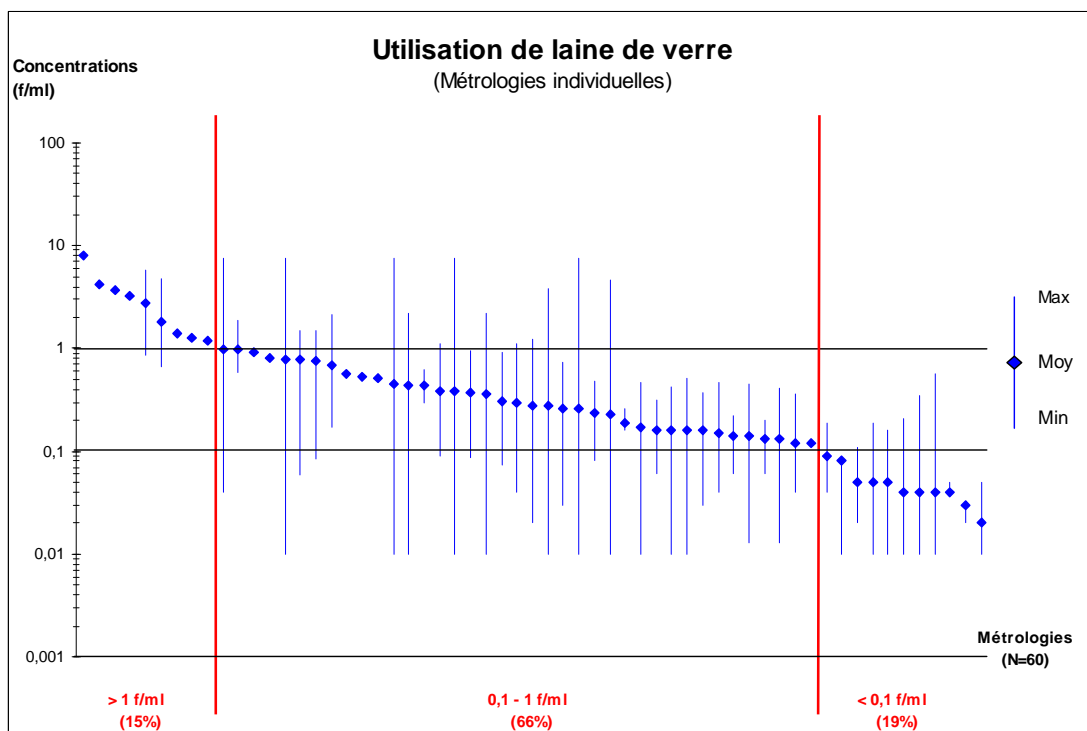


Figure 80 : concentrations observées dans le secteur du BTP "Travaux d'isolation" lors de l'utilisation de laine de verre (métrologies individuelles)

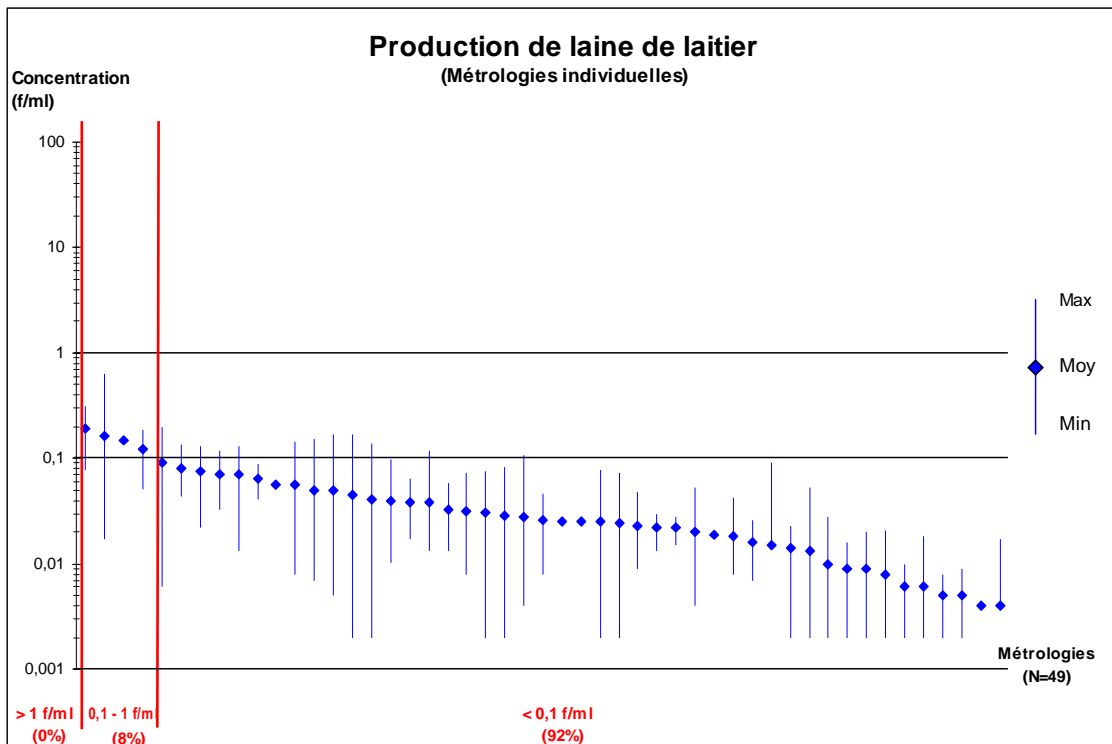


Figure 81 : concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de laine de laitier (métrologies individuelles)

Code Nace : 2682 - Fabrication de produits minéraux non métalliques n.c.a

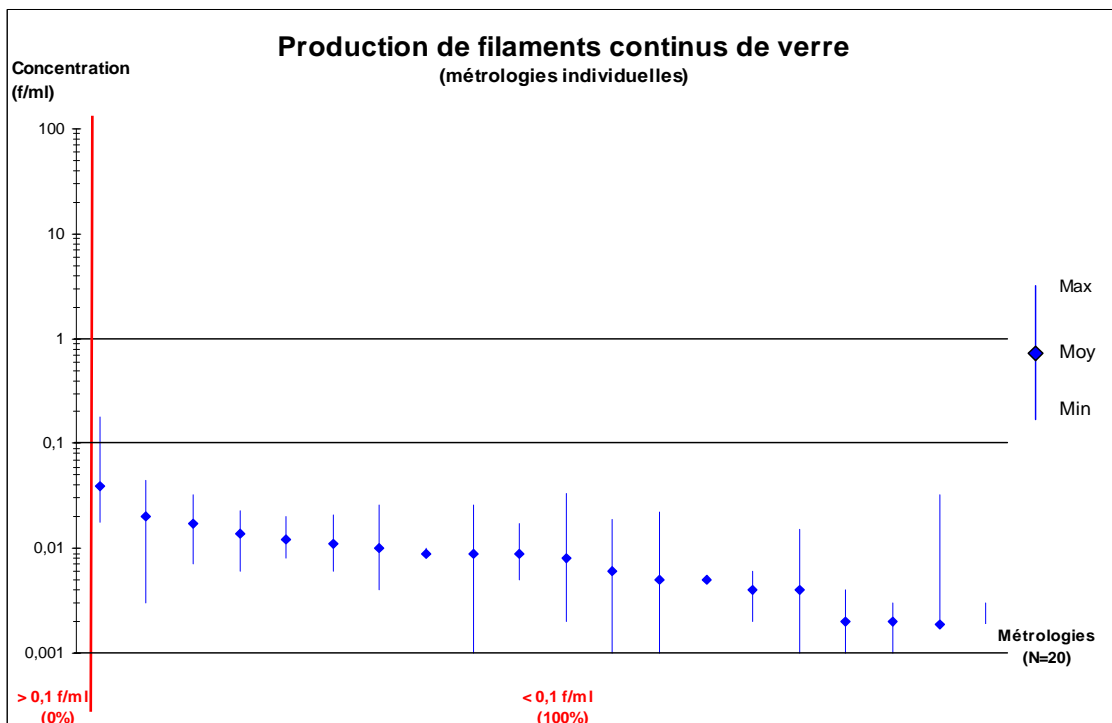


Figure 82 : concentrations observées dans le secteur de la production et de la transformation de filaments continus de verre (métrologies individuelles)

Code Nace : 2614 - Fabrication de fibres de verre

6.3.2.4 Discussion

Les résultats extraits de la base Evalutil et présentés dans ces graphiques sont uniquement basés sur des prélèvements individuels. Aucun de ces résultats n'est une pondération sur la durée d'une journée de travail, susceptible d'être directement comparé à une VLEP. Il n'existe pas ou peu de données combinant des niveaux avec pics d'exposition et bruit de fond sur une journée de travail. Il s'agit pourtant d'expositions types rencontrées dans le secteur de la production et de la transformation par exemple.

Au regard des informations disponibles dans Evalutil, les situations les plus exposantes semblent concerner essentiellement trois grandes activités :

- Les activités de soufflage de laines minérales, notamment dans les combles, où des niveaux importants peuvent être atteints ;
- Les activités de transformation de produits primaires en produits secondaires : plaques, produits moulés...), génératrices de forts niveaux d'exposition sur les tâches observées (beaucoup de tâches de type usinage : ponçage, découpage...);
- Et, même si peu de prélèvements existent (aucun dans les résultats présentés ici), les activités de retraits de matériaux anciens.

A noter : bien qu'il soit généralement admis que dans le secteur de la production à proprement parlé (fibérisation, conditionnement), les niveaux moyens soient relativement faibles, il est nécessaire de nuancer ces résultats ; les entreprises de production comportent souvent des lignes dites de transformation (fabrication de produits secondaires : plaques, coquilles...). Or, dans ces activités de transformation, les tâches de découpe, de ponçage ou de rabotage sont fréquentes et entraînent des niveaux d'exposition sensiblement plus élevés que les niveaux d'empoussièremment de la seule activité de production stricto sensus.

En termes de recommandations, des campagnes de prélèvements en milieux utilisateurs de laines minérales avec des prélèvements de longues durées seraient nécessaires afin de pouvoir refléter l'exposition globale et cumulée au cours d'une journée de travail. Elles permettraient d'obtenir une meilleure vision des expositions et de définir des axes de priorités en termes de réductions des expositions. Il est aussi nécessaire de connaître les expositions sur des matériaux anciens pour des travaux de retraits d'isolation, ainsi que pour des travaux d'entretien nécessitant la dépose momentanée de l'isolation (entretien de tuyauteries, travaux de câblages dans des combles isolés, etc.).

6.3.3 Conclusion commune aux bases COLCHIC et EVALUTIL

Les données d'exposition issues de la base COLCHIC et Evalutil permettent de souligner la large utilisation des laines minérales dans un grand nombre de secteurs d'activité.

Même si des éléments issus de la base COLCHIC attestent d'une diminution significative de l'exposition au cours du temps ; cela ne permet pas d'en tirer une conclusion générale car les données en utilisation sont lacunaires.

Pour les laines minérales, les niveaux d'exposition montrent que sur l'ensemble des deux bases de données, le taux de dépassement de la VME fixée à 1 f/ml reste relativement faible et ce quel que soit le type de fibres. Par ailleurs l'analyse des résultats de la base COLCHIC, des différentes populations de fibres comptées par MOCP, met en évidence une augmentation de la proportion de fibres fines en suspension dans l'air au cours du temps. Cette situation est probablement liée à une modification des caractéristiques dimensionnelles des laines minérales au cours du temps.

Pour les filaments continus de verre, les niveaux d'exposition apparaissent moins importants que pour les laines minérales et le taux de dépassement de la VME fixée à 1 f/ml reste également très faible. Les experts soulignent que l'exposition peut dans ce cas être aussi associée à des particules allongées émises notamment lors de l'usinage de matériaux

composites. Dans ce cas, elles proviennent soit de la résine, soit de particules allongées issues de la matrice à laquelle les filaments continus de verre sont associés (opérations d'usinage, de ponçage...)

Très peu de données ont pu être collectées ou identifiées pour les activités associées soit à un retrait de laines minérales usagées (arrachage, grattage...), soit à une intervention dans des locaux contenant ce type de matériaux ; ces activités étant *a priori* plus exposantes pour le travailleur. Il paraît donc nécessaire de consolider et de réaliser des mesures d'exposition complémentaires chez les utilisateurs notamment lors d'opérations d'installation, de retrait, de laines d'isolation d'activités dans des lieux à isoler (intervention dans des combles par exemple) et d'élimination des déchets.

Il faudrait enfin prévoir des campagnes de prélèvements de longues durées afin de préciser l'exposition globale et cumulée au cours d'une journée de travail. Cette stratégie de prélèvement, ne doit pas occulter la nécessité de caractériser l'exposition lors de tâches courtes particulièrement polluantes.

6.4 Evaluation de la prévalence de l'exposition professionnelle

6.4.1 Evaluation de la prévalence de l'exposition professionnelle aux laines minérales et filaments de verre continus

La plupart des études fournissant des données d'exposition aux fibres minérales artificielles ne distinguent pas les différents types de fibres. Les populations exposées le sont cependant vraisemblablement, très majoritairement aux laines minérales, qui sont les plus utilisées.

La base de données CAREX (Vincent et al. 1999) et l'enquête Sumer 2003 (Equipe Sumer 2006) peuvent permettre d'estimer la proportion de travailleurs exposés aux laines minérales en France à une période donnée (1990-1993 pour CAREX et 2003 pour Sumer). Dans l'enquête Sumer, la proportion de salariés exposés aux fibres minérales artificielles (hors fibres de céramique) est de 2% (3,4% chez les hommes et 0,2% chez les femmes). CAREX fournit uniquement une estimation du nombre de travailleurs exposés aux laines de verre (128892, soit environ 0,6% de la population active). La proportion d'exposés aux fibres minérales artificielles a pu également être estimée à partir d'une matrice emplois-expositions à 1,1% de la population active finlandaise en 1995-1997 (Kauppinen *et al* 1998). Ces études ne permettent cependant pas d'estimer une prévalence d'exposition « vie entière », c'est-à-dire la proportion de travailleurs exposés au moins une fois dans leur vie active, qui est par définition plus élevée. Les expositions aux filaments continus ne sont pas spécifiquement évaluées.

Dans des études récentes visant à estimer des fractions de risque attribuables à des expositions professionnelles, les auteurs multiplient par 3 (Autier P et al. 2007) ou 4 (Nelson, et al. 2003) les prévalences d'exposition instantanées pour obtenir des prévalences vie entière. Si l'on applique ces facteurs, on obtient des prévalences d'exposition aux laines minérales vie entière variant entre 1,8% et 2,4% pour CAREX (laine de verre uniquement) et entre 6% et 8% pour Sumer (de 10,2% à 13,6% pour les hommes).

Une estimation de la prévalence d'exposition vie entière peut être obtenue à partir de la proportion d'exposés chez les témoins d'études cas-témoins en population générale. Plusieurs études cas-témoins ont porté sur l'exposition professionnelle aux fibres minérales artificielles. Une seule étude publiée porte spécifiquement sur la France (Marchand *et al*; 2000), une autre inclut des données françaises (Luce et al. 2002); dans ces deux études, les expositions spécifiques aux laines minérales et aux filaments continus sont différenciées. Les données d'une étude cas-témoins en cours, réalisée dans le cadre du Programme National de Surveillance du Mésothéliome (PNSM) (Goldberg et al. 2006) ont également été utilisées. Les autres études concernent différents pays européens : Allemagne (Bruske-Hohlfeld et al. 2000, Pohlabein et al. 2000, Rodelsperger et al. 2001), Suède (Gustafson et al. 2007, Gustavsson et al. 1998, Toren et al. 1999) Europe de l'Est et Royaume-Uni (Carel et al. 2007).

Les données des études cas-témoins portant sur les expositions professionnelles aux fibres minérales artificielles sont résumées ci-dessous

Tableau 46: Les données des études cas-témoins portant sur les expositions professionnelles aux fibres minérales artificielles

| Etude | | Pays | Nombre de témoins | Période d'interview | Exposition évaluée | Méthode d'évaluation | % d'exposés | Commentaires |
|------------------------|------|------------------------------------|--|---------------------|---|----------------------|------------------------------|---|
| Gustavsson et al. | 1998 | Suède | 756 hommes | 1988-1990 | fibres minérales artificielles | experts | 6,7 | |
| Toren et al. | 1999 | Suède | 721 hommes 738 femmes | 1996 | fibres minérales artificielles | auto-déclaration | 5,7 0 | |
| Brüske-Holfeld et al. | 2000 | Allemagne | 3541 hommes | 1988-1996 | laines minérales (isolation) | quest. spécifiques | 4,8 | |
| Pohlabeln et al. | 2000 | Allemagne | 3541 hommes | 1988-1996 | laines minérales (isolation + électriciens) | quest. spécifiques | 6,3 | même étude que Brüske-Holfeld |
| Marchand et al. | 2000 | France | 295 hommes | 1986-1992 | laines minérales fil Continus | matrice emp-exp | 7,6* 0,4* | probabilité non nulle d'exposition : 33,6 % probabilité non nulle d'exposition : 3,7 % |
| Rödelsperger et al. | 2001 | Allemagne | 125 hommes | 1988-1997 | fibres minérales artificielles | experts | 11,2 | |
| Luce et al. | 2002 | 8 pays (dont France) | 2349 hommes 787 femmes 2349 hommes 787 femmes | 1979-1990 | laines minérales fil continu | matrice emp-exp | 5,0* 0,5* 0,4* 0,4* | probabilité non nulle d'exposition : 21,3 % probabilité non nulle d'exposition : 4,4 % probabilité non nulle d'exposition : 3,7 % probabilité non nulle d'exposition : 2,5 % |
| Etude cas-témoins PNSM | 2007 | France | 690 hommes 144 femmes | 1998-2002 | laines minérales | experts | 19,7 0,7 | exposition probable; + 5,2 % possible exposition probable; + 2,1 % possible |
| Carel et al. | 2007 | Europe de l'Est Royaume-Uni | 2305 hommes | 1998-2002 | fibres minérales artificielles | experts | 3,4 10,7 | 0,9% de femmes exposées aux fibres synthétiques (cas+témoins) |
| Gustafson et al. | 2007 | Suède | 349 hommes 408 femmes | 1997-2000 | fibres minérales artificielles | auto-déclaration | 17,2 1,0 | |

* % calculé en prenant en compte les probabilités d'expositions (données non publiées)

Pour les laines minérales, les proportions d'exposés chez les hommes varient de façon importante, de 3,4% à 19,7%. La définition de l'exposition évaluée, la méthode d'évaluation de l'exposition et la période de réalisation diffèrent cependant selon les études. La prévalence d'exposition la plus faible est observée dans les pays d'Europe de l'Est, qui sont probablement moins comparables à la France que les pays d'Europe occidentale. Des prévalences d'exposition plus élevées sont observées dans les études les plus récentes. Les quatre études comportant des données pour les femmes donnent une estimation de la proportion d'exposées inférieure à 1%.

Pour les filaments de verre continus, la prévalence d'exposition, estimée à partir des deux seules études fournissant des données est de 0,4% chez les hommes comme chez les femmes.

6.4.1.1 Synthèse et conclusion

Les études cas-témoins peuvent permettre d'estimer la prévalence d'exposition sur l'ensemble de la vie active. Les témoins des études analysées ne sont cependant pas toujours représentatifs de la population des pays concernés. Dans l'étude de Carel *et al.* (2007) par exemple, les données pour le Royaume-Uni proviennent uniquement de la région de Liverpool. Peu d'études comportent des données concernant les femmes. La seule étude publiée concernant la France donne une prévalence d'exposition aux laines minérales chez les hommes d'environ 8%. Il s'agit cependant d'une enquête assez ancienne, qui concerne des sujets ayant terminé leur carrière professionnelle dans les années 80. L'utilisation des laines minérales a augmenté après cette période. Les données préliminaires de l'enquête cas-témoins sur le mésothéliome, plus récente, donnent une proportion d'exposés beaucoup plus élevée.

Les différences entre les prévalences d'exposition aux laines minérales estimées à partir de CAREX (0,6%) et de Sumer (2%) peuvent s'expliquer par le fait que les estimations ne portent pas sur la même période (1990-1993 pour CAREX, 2003 pour Sumer), et que CAREX ne prend en compte que la laine de verre. Une estimation indirecte de la prévalence vie entière à partir de ces données amène à un ordre de grandeur comparable à ce qui est observé à partir des études cas-témoins.

Les données disponibles sont parcellaires, particulièrement pour les filaments continus, et ne permettent de donner qu'un ordre de grandeur. L'exposition aux filaments continus concerne vraisemblablement moins de 1% de la population. On peut estimer que la prévalence de l'exposition professionnelle vie entière aux laines minérales est probablement de l'ordre de 10% chez les hommes, et de 1% chez les femmes. Une matrice emplois-expositions aux laines minérales est actuellement en cours de finalisation au Département santé travail de l'InVS. Ce département dispose également d'un échantillon de 10000 sujets, représentatif de la population française, avec une histoire professionnelle complète. Lorsque la matrice sera disponible, il sera possible, en l'appliquant à cet échantillon, d'estimer plus précisément la prévalence d'exposition vie entière dans la population française, et de décrire les expositions par secteur, par métier, ainsi que les évolutions au cours du temps.

7 Conclusions du groupe de travail

Ce rapport s'inscrit dans la continuité du traitement de la saisine reçue par l'Afsset pour évaluer l'exposition au FMA dans la population générale et celle des travailleurs. Il s'intéresse à deux types de fibres : les laines minérales et les filaments de verre continus. Le contenu de ce rapport est une synthèse des données publiées dans la littérature et collectées auprès des principaux acteurs appartenant à la filière de ces fibres (producteurs, utilisateurs, personnel de maintenance, gestion de déchets, etc), La rédaction s'est donc appliquée, en l'état actuel des connaissances, à répondre aux interrogations formulées par la saisine concernant notamment les aspects techniques liés aux caractéristiques et aux usages de ces fibres mais aussi l'évaluation de l'exposition de la population générale et professionnelle.

Les laines minérales et les filaments continus de verre ont été classés dans le groupe 3 du CIRC c'est-à-dire « Inclassable quant à leur cancérogénicité pour l'Homme ». Ils sont exonérés de la classification en tant que substance cancérogène par l'Union Européenne lorsqu'ils répondent aux critères de la directive européenne 97/69/CE. Les laines minérales restent classées irritantes pour la peau.

7.1 Les laines minérales

Les laines minérales sont des matériaux d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie. Elles incluent les laines de verre, élaborées à partir de sable, les laines de roche élaborées à partir de basalte et les laines de laitier élaborées à partir de scories de hauts-fourneaux (ces dernières sont souvent assimilées aux laines de roche).

7.1.1 Composition chimique

Au début des années 1990, les producteurs l'ont modifiée afin d'accroître la solubilité de ces fibres dans les tissus biologiques ; elle a continué à évoluer pour correspondre aux dispositions de la directive européenne 97/69/CE et satisfaire aux critères d'exonération du classement cancérogène²³.

7.1.2 Diamètre moyen

A l'heure actuelle, il s'établit entre 3 et 8 μm . A noter que depuis les deux dernières décennies, la tendance est à une diminution continue du diamètre moyen des fibres produites par les industriels.

²³ Note Q de la directive EU 97/69/CE

La classification comme cancérigène ne doit pas s'appliquer s'il peut être établi que la substance remplit l'une des conditions suivantes :

-Un essai de biopersistance à court terme par inhalation a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 μm ont une demi-vie pondérée inférieure à 10 jours.

-ou un essai de biopersistance à court terme par instillation intratrachéale a montré que les fibres d'une longueur supérieure à 20 μm ont une demi-vie pondérée inférieure à 40 jours.

- Ou un essai intrapéritonéal approprié n'a montré aucune évidence d'excès de cancérogénicité

- Ou un essai à long terme par inhalation approprié a conduit à une absence d'effets pathogènes significatifs ou de modification néoplasiques

Note R

La classification comme cancérigène ne doit pas s'appliquer aux fibres dont le diamètre moyen géométrique pondéré par la longueur moins deux erreurs types est supérieur à 6 μm

7.1.3 Liants

En règle générale, les laines minérales contiennent plus de 90% de fibres, 3 à 5% de liants organiques (résines formo-phénoliques) qui assurent la cohésion du produit et moins de 1% d'huile qui limite l'émission de poussière et l'absorption de l'eau. Suite à une réaction chimique et thermique, le liant devient solide et libère une quantité résiduelle de formaldéhyde (recherché pour son activité biocide) susceptible d'émaner du produit lors de la pose ou de l'utilisation. Une étude réalisée à la demande de l'Afsset, montre que, tous les produits d'isolation (neufs et anciens) testés, ont des émissions en composés organiques volatils respectant les seuils fixés par le protocole Afsset 2006²⁴, à l'exception du formaldéhyde. Les émissions de formaldéhyde, principal composé dégagé, peuvent perdurer, même plusieurs années après la pose, comme le montre des essais réalisés sur les produits anciens.

Pour certaines applications telles que les fours électroménagers, les producteurs Européens proposent des solutions sans liant organique. A noter que les laines de laitier ne contiennent pas de liant.

7.1.4 Marché de l'isolation thermique

Il est en forte augmentation depuis 20 ans. Les industriels indiquent une tendance similaire au niveau européen et mondial ; soit une augmentation de la production consécutive aux deux chocs pétroliers et aux exigences du protocole de Kyoto qui demande une baisse de la consommation d'énergie et, par conséquent, une meilleure isolation. En France, les quantités de laines minérales utilisées dans le bâtiment pour l'année 2000 étaient de l'ordre de 12 à 13 millions de m³ pour la laine de verre, et de 3 à 4 millions de m³ pour la laine de roche. A l'heure actuelle, les laines minérales représentent entre 60 et 70 % des matériaux d'isolation utilisés en France.

7.1.5 Présentation et usages

Les laines minérales répondent favorablement aux exigences notamment réglementaires, en termes d'isolation thermique, acoustique et de protection incendie.

Leurs usages sont largement répandus dans le bâtiment, l'aéronautique, la construction navale, les bâtiments de production d'électricité...

Les laines minérales existent sous différentes formes: panneaux rigides, panneaux ou rouleaux semi-rigides, rouleaux souples, flocons, coquilles. Le bâtiment représente 90 % des usages et concerne l'isolation des toits, des murs, des planchers et l'étanchéité dans le secteur des bâtiments résidentiels et non résidentiels. A noter que la technique d'isolation des toitures utilisant la laine soufflée en flocons est de plus en plus utilisée, alors que cette technique est *a priori* la plus émissive en termes de fibres

Le calorifugeage des tuyauteries ou des équipements thermiques industriels représente 5 % des quantités de laine minérale utilisée. Les autres usages représentent également 5 % mais concernent toutefois un grand nombre d'applications et de produits. .. Elles incluent, entre autre, la projection ou flocage notamment pour la protection incendie des bâtiments en mélange avec des additifs (plâtres, ciment...), les appareils électroménagers ... A noter que la France apparait le plus important utilisateur européen de la technique par projection.

²⁴ Procédure de qualification des produits de construction sur la base de leurs émissions de composés organiques volatils et de critères sanitaires. Octobre 2006. Disponible sur www.afsset.fr.

7.1.6 Identification

Il n'existe pas de code ou de marquages spécifiques inscrits sur la laine minérale (aucune réglementation ne l'exige). Toutefois, les producteurs ont rédigé des fiches de données de sécurité.

7.1.7 Vieillessement

Il correspond à toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement. Les données disponibles restent actuellement limitées et incluent, entre autres, une étude réalisée à la demande de l'Afsset. Cette étude souligne notamment que les matériaux vieillis relâchent sans doute davantage de fibres au moment de leur retrait, que durant leur installation.

7.1.8 Les déchets de chantiers en laines minérales :

Ils sont admis en décharge pour déchets non dangereux (Centre d'Enfouissement Technique de classe 2).

7.2 Les filaments de verre continus

7.2.1 Définition et propriétés

Ce sont des fibres d'une longueur suffisante pour être compatible avec une utilisation sous forme de textiles. Elles sont disposées sous forme orientée parallèle. Les matériaux de base destinés à la fabrication du verre incluent la silice, la chaux, le kaolin, l'alumine... dont les proportions aboutissent à différents types de verre aux propriétés chimiques et physiques particulières.

Le diamètre nominal des fibres de verre à filaments continus s'établit entre 3 et 25 µm. La distribution du diamètre est très étroite avec une faible variabilité.

A la sortie de la filière, les filaments reçoivent un revêtement de surface protecteur appelé ensimage. Il a pour but de lier les filaments de base en les revêtant d'une pellicule lubrifiante destinée à les protéger au cours de la fabrication du tissu.

7.2.2 Utilisation

La principale finalité des filaments continus de verre (environ 90% de son usage) est de servir de renfort dans les matériaux composites.

Les composites Fibres-Résine sont les plus répandus. Ils sont constitués :

- d'une ossature conçue jusqu'à 90% en volume de filaments appelée renfort qui assure la tenue mécanique ;
- d'une matrice qui lie les fibres renforts et répartit les efforts. Par ailleurs, elle assure la protection chimique et la cohésion des fibres ;
- d'éléments additionnels comme les charges, l'ensimage, etc

De nombreux procédés sont mis en œuvre pour fabriquer les matériaux composites dont le plus utilisé reste le moulage par injection.

7.2.3 Marché

La production mondiale des filaments de verre continus a augmenté de 5%/an au cours des 25 dernières années. Pour la période 2005-2008, cette progression est de 6,5% avec plus de 3500 ktonnes de fibres de verre produites pour 2008.

L'Europe représente un tiers de la production mondiale de composites et la France environ 16 % de la production européenne soit 270 à 300 kT avec plusieurs centaines d'entreprises de toutes tailles. Les secteurs utilisant ces matériaux sont par ordre décroissant de tonnage utilisé : le bâtiment et les infrastructures (évier, toiles à peindre, éclairage, ponts) ; le transport (carrosserie, pare-chocs, tableaux de bord); l'électricité (armoires de distribution, chemins de câbles et l'électronique, circuits imprimés); la plaisance et le loisir (bateaux, piscines); l'équipement industriel (tuyaux, réservoirs, pâles d'éoliennes) les biens de consommations (capotage d'appareils électroménagers, stylos) etc...

Les déchets de fils de verre sont considérés comme des déchets industriels banals selon la réglementation. Plus de 90 % des déchets de production en composites thermoscurcissables sont actuellement mis en décharge.

7.3 Métrologie des fibres

En milieu professionnel, la mesure des FMA s'effectue réglementairement par microscopie optique à contraste de phase, MOCP.

Pour la mesure des expositions environnementales, la microscopie optique à lumière polarisée (MOLP) et la microscopie électronique à balayage analytique (MEBA) sont les méthodes les plus adaptées. Les fibres mesurées dans l'air des bâtiments peuvent être de nature différente. La MOCP ne convient pas puisqu'elle ne permet pas leur identification.

A noter que les niveaux de FMA dans l'air mesurés dans les bâtiments par les techniques MOLP et MEBA diffèrent d'un à deux ordres de grandeur. Dans les essais où les niveaux d'émission de laines minérales sont faibles (inférieurs à 0,002 F/cc), la MEBA, utilisée à un fort grossissement, n'a pas la sensibilité suffisante pour détecter de telles concentrations. Or, c'est dans cette gamme que se situent les niveaux d'empoussièrtements en FMA dans l'environnement.

7.4 Exposition de la population

7.4.1 Exposition des travailleurs

Les données d'exposition, issues de la base COLCHIC et Evalutil, permettent de souligner la large utilisation des laines minérales dans un grand nombre de secteurs d'activité.

Des éléments issus de la base COLCHIC attestent d'une diminution des niveaux de l'exposition au cours du temps.

Pour les laines minérales, les niveaux d'exposition montrent que, sur l'ensemble des deux bases de données, le taux de dépassement de la VME (valeur moyenne d'exposition) fixée à 1 f/ml est de l'ordre de 10%.

Par ailleurs, l'analyse des résultats de la base COLCHIC, pour différentes populations de fibres, met en évidence une augmentation au cours du temps de la proportion de fibres fines en suspension dans l'air. Cette situation est probablement liée à une modification des caractéristiques dimensionnelles des laines minérales dans les vingt dernières années.

Très peu de données ont pu être collectées pour les activités associées soit à un retrait de laines minérales usagées (arrachage, grattage...), soit à une intervention dans des locaux contenant ce type de matériaux. Cependant, les informations disponibles indiquent que ces activités sont plus exposantes pour le travailleur que la pose ou la production.

Pour les filaments continus de verre, les niveaux d'exposition apparaissent moins importants et le taux de dépassement de la VME fixée à 1 f/ml reste également très faible. L'exposition peut dans ce cas être aussi associée à des particules allongées émises notamment lors de l'usinage de matériaux composites. Dans ce cas, elles proviennent soit de la résine, soit de la matrice.

7.4.2 Estimation de la prévalence d'exposition professionnelle

Les données disponibles sont parcellaires, particulièrement pour les filaments continus, et ne permettent de donner qu'un ordre de grandeur. L'exposition vie entière aux filaments continus concerne vraisemblablement moins de 1% de la population. On peut estimer que la prévalence de l'exposition professionnelle vie entière aux laines minérales est probablement de l'ordre de 10% chez les hommes, et de 1% chez les femmes. Une matrice emplois-expositions aux laines minérales est actuellement en cours de finalisation au Département santé travail de l'InVS et devra fournir prochainement plus de précisions.

7.4.3 Exposition de la population générale aux laines minérales

Les données disponibles actuellement sont limitées. En MOLP, le fond de pollution de l'environnement urbain parisien ne dépasse pas 2 F/ m³ ²⁵ pour les fibres de diamètre <3µm. Le niveau d'exposition dans les bâtiments non résidentiels en France est également très faible, 75% des mesures étant inférieures à 6 F/ m³. Lors d'une étude portant sur deux chantiers de retrait des laines minérales, les concentrations retrouvées à 30 m du chantier sont 100 fois supérieures au fond de pollution.

²⁵ Pour rappel, 1 F/ m³ correspond à 1 x 10⁻⁶ f/ml

8 Bibliographie

- Ademe. 2004. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie Guide de rédaction d'un SME - secteur des composites.
- AFNOR: Norme NF X 43-050. 1996. Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission; Méthode indirecte., 42p.
- AFNOR: Norme XP 43-269: Air des lieux de travail. Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie à contraste de phase - Méthode du filtre à membrane.
- Afsset. 2007. Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail: Les fibres minérales artificielles siliceuses: les fibres céramiques réfractaires et les fibres de verre à usage spécial, évaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs. www.afsset.fr
- Ahrens A, Braun.A, Von Gleich A, Heitmann.K, and Lissner.L. 2006. *Hazardous chemicals in products and processes: substitution as an innovative process*. Ed. Physica Verlag. A Springer company
- Antoine H. 2002. Thèse réalisée au CSTB Evaluation de la capacité d'émission des fibres par des matériaux isolants vieillis artificiellement: Application aux laines minérales artificielles. Thèse réalisée au CSTB Evaluation de la capacité d'émission des fibres par des matériaux isolants vieillis artificiellement: Application aux laines minérales artificielles.
- APFE. 2003. European Glass Fibre Producers Association: Continuous Filament Glass Fibre and Human Health. <http://corporateportal.ppg.com/NR/rdonlyres/371010C9-E1A1-4E74-A19C-B723F8197D3F/0/apfe.pdf>
- ARAMM. 2003. Agence Rhône-Alpes pour la Maitrise des Matériaux: Valorisation des déchets en composites thermodurcissables. Le Bourget Du Lac. http://www.agmat.asso.fr/test3/seminaires/histo_seminaires/2003/Recycomp/presentations/GUIDE.pdf
- ARAMM. 2005. Agence Rhône-Alpes pour la Maitrise des Matériaux: Guide déchets: valorisation des déchets composites a matrice thermodurcissable. : http://www.agmat.asso.fr/test3/indus_rech/projets/textes/GUIDE_Recycomp2.pdf
- ATSDR. 2002. Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Technical Briefing paper: Health effects from exposure to fibrous glass, rock woll, or slag wool. <http://www.atsdr.cdc.gov/DT/fibrous-glass.html>
- ATSDR. 2004. Agency for Toxic Substances and Disease Registry: Toxicological profile for Synthetic vitreous fibers. Atlanta, Georgia, U.S.

- Autier P; ,Boffetta P; ,Boniol M; ,Boyle P; ,Ferlay J; ,Aurengo A; et al. 2007. Attributable causes of cancer in France in the year 2000. IARC ,Lyon.
- Baan RA, and Grosse Y. 2004. Man-made mineral (vitreous) fibres: evaluations of cancer hazards by the IARC Monographs Programme. *Mutat. Res.* 553 (1-2): 43-58.
- Bahlouli N. 2008. Cours Matériaux Composites. Université de Strasbourg, Institut professionnel des sciences et techniques.. <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/tm.htm>
- Baïlon JP. Dorlot JM. 2000. *Des matériaux, 3e édition*. Montréal: Presses internationales polytechnique.
- Balay C. 2005. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Techniques de l'ingénieur. Ref AM 5130
- Batim'Etudes pour l'Afsset. 2008. Isolation thermique des bâtiments neufs en France, Observatoire de la construction neuve.
- Berreur L, Nosperger S, and de Maillard B. 2002. L'industrie française des matériaux composites Etude stratégique. Nodal consultants pour le compte de la DiGITIP.
- BING. 2008. Federation of European rigid polyurethane foam association. www.bing.org
- Bishop K, Ring SJ, Zoltai T, Manos CG, Ahrens VD, and Lisk DJ. 1985. Identification of asbestos and glass fibers in municipal sewage sludges. *Bull Environ Contam Toxicol* 34 (3): 301-308.
- Bouchat M, and Guissart T. 2003. Cinquième rapport de veille effectué pour Cefoverre. www.cdc.be/files/PDF/rapport%20veille%20CEFOVERRE_sept%2006.doc
- Boullanger C, and Martinon L. 2007. LEPI: Etude comparative de deux méthodes d'analyse des niveaux de Fibres Minérales Artificielles dans l'air: Microscopie Optique à Lumière Polarisée et Microscopie Electronique à Balayage.
- Breyse PN. 1991. Electron Microscopic Analysis of Airborne Asbestos Fibers. *Crit Rev Anal Chem.* (22), Issue 3 & 4, pages 201 - 227
- Brisson M. 2006. SOFICAR: Les fibres de carbone: procedes de fabrication et principale utilisations. www.uisba.com/documents/ANIMATION/COMPTE_RENDUS/CRSOFICAR18MAI2006.pdf
- Bruske-Hohlfeld I, Mohner M, Pohlabein H, Ahrens W, Bolm-Audorff U, Kreienbrock L, Kreuzer M, Jahn I, Wichmann HE, and Jockel KH. 2000. Occupational lung cancer risk for men in Germany: results from a pooled case-control study. *Am. J. Epidemiol.* 151 (4): 384-395.
- Caramaro L. 2006. Textiles à usage technique. Techniques de l'ingénieur, référence N - 2511. http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/textiles_a_usage_technique/N2511

- Carel R, Olsson AC, Zaridze D, Szeszenia-Dabrowska N, Rudnai P, Lissowska J, Fabianova E, Cassidy A, Mates D, Bencko V, Foretova L, Janout V, Fevotte J, Fletcher T, 't MA, Brennan P, and Boffetta P. 2007. Occupational exposure to asbestos and man-made vitreous fibres and risk of lung cancer: a multicentre case-control study in Europe. *Occup. Environ. Med.* 64 (8): 502-508.
- CARMA. 2004. Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés; Glossaire des matériaux composites. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.
- http://www.materiatech-carma.net/module/upload/GlossaireMateriauxComposites_CARMA.pdf
- Carter CM, Axten CW, Byers CD, Chase GR, Koenig AR, and Reynolds JW. 1999. Indoor airborne fiber levels of MMVF in residential and commercial buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc* (60) , 794-800.
- CEE. 1990. European concerted action: Indoor air pollution by formaldehyde in european countries.
- Cholak J, and Schafer L. 1971. Erosion of fibers from installed fibrous-glass ducts. *Arch. Env. Health.* 220-229.
- Christensen V, Eastes W, Hamilton R, and Struss A. 1993. Fiber Diameter Distributions in Typical MMVF Wool Insulation Products, *Am. Ind. Hyg. Assoc.* (42) 232-238.
- CHSPF. 2004. Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France: Avis concernant la protection de la population contre les risques pour la sante de l'exposition aux fibres minérales artificielles siliceuses.
http://www.sante.gouv.fr/htm/dossiers/cshpf/a_mv_050204_fibres.pdf
- Cinquin J. 2002. Les composites en aérospatiale. Techniques de l'ingénieur. Référence AM 5645 http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/les_composites_en_aerospatiale/AM5645
- CSTB. 2007. Caractérisation de la libération des fibres minérales artificielles dans l'air par des matériaux vieillies. Etude effectuée pour le compte de l'Afsset.
- CSTB, Note spéciale. Groupe spécialisé n°20 "produits et procédés spéciaux d'isolation". 2007. Performances des produits réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe des bâtiments en tant que complément d'isolation thermique.
http://www.cstb.fr/fileadmin/documents/evaluation/Atec/GS20_note.pdf
- David Rigby Associates. 2004. Technical textiles and industrial nonwovens: World Market Forecasts to 2010 - The Overview Report.
http://dratex.co.uk/acatalog/TECHNICAL_TEXTILES_AND_NONWOVENS_OVERVIEW.htm
- De Vuyst P, Brochard P., and Pairon JC. 2000. Effets sur la santé des fibres minérales artificielles. In *Encycl. Méd. Chiro, Toxicologie- Pathologie professionnelle*, ed Editions Scientifique et Médicales, p.6. Paris: Elsevier SAS .

- De Vuyst P., Dumortier P., Swaen GM, Pairon JC, and Brochard P. 1995. Respiratory health effects of man-made vitreous (mineral) fibres. *Eur Respir J* 8 (12): 2149-2173.
- Directive 67/548/CEE. 1967. Directive 67/548/CEE du Conseil, du 27 juin 1967, concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses.
- Directive 97/69/CEE. 1997. Directive 97/69/CE de la Commission du 5 décembre 1997 portant vingt-troisième adaptation au progrès technique de la directive 67/548/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE) .
- Dodgson J., Harrison G.E, Cherrie J.W., and Sneddon E. 1990. Assessment of airborne mineral wool fibres in domestic houses. Institute of Occupational Medicine, Edimburgh, UK. Report N°TM 87 18
- Dodgson J, Cherrie J, and Groat S. 1987. Estimates of past exposure to respirable man-made mineral fibres in the European insulation wool industry. *Ann. Occup. Hyg.* 31 (4B): 567-582.
- Dodgson J, Ottery J, Cherrie JW, and Harrison GE. 1980. Fibre concentrations and size distributions of airborne fibres in several European man-made mineral fibre plants. *IARC Sci. Publ.* (30): 913-925.
- ECFIA. 2005. European Ceramic Fibres Industry Association: Auditions de l'ECFIA par l'Afsset le 11 janvier 2005 et le 14 avril 2005 et réponses aux questions de l'Afsset concernant les fibres céramiques réfractaires.
- EIPPCB. 2001. European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau; Institute for Prospective Technological Studies Integrated Pollution prevention and Control, Reference Document on Best Available Techniques in the Glass Manufacturing Industry. <http://eippcb.jrc.es>
- Environnement Canada. 1993. Fibres minérales (fibres vitreuses de fabrication humaine). Loi canadienne sur la protection de l'environnement : liste des substances toxiques (LCPE). http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/contaminants/psl1-lsp1/mineral_fibres_minerale/mineral_fibres_f.pdf
- Equipe Sumer. 2006. Les expositions aux risques professionnels par famille professionnelle, Résultats SUMER 2003. <http://www.travail.gouv.fr/IMG/pdf/DE121fichesfapsumer.pdf>
- EUCEB. 2008. European Certification Board for Mineral Wool Products. www.eucb.org
- EURIMA. 2008. "European Association of Insulation Manufacturers: Using Mineral wool." Available from www.eurima.org.
- EURIMA, ECFIA, and APFE. 1991. Man-made mineral fibres: Definitions and classifications proposals. eds B APFE, B EURIMA and ECFIA Chester.

- FILMM. 2002. Livre Blanc du FILMM - Production, application des laines minérales. Syndicat national des fabricants d'isolants en laines minérales manufacturées
- FILMM. 2007. Syndicat national des fabricants d'isolants en laines minérales manufacturées: Les laines minérales dans le bâtiment. Dossier consécutif aux auditions du FILMM par l'Afsset (non publié).
- Fischer N; Kalliokoski, P., Jantunen, M. Seppänen, O. 1993. Benefits and risks from MMMF in indoor air. *Indoor Air, Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, vol 427-31. Helsinki, Jyväskylä, Finland.
- Fitzer E, Kleinholz R, and Tiesler H. 1988. Fibers, synthetic inorganics. In *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, eds Gerhartz W, YamamotoYS, Elvers B and eds., 1-66.
- Freedonia. 2007. Report: Glass Fibers to 2011.
<http://www.freedoniagroup.com/DocumentDetails.aspx?DocumentId=119613>
- Gaudichet A, Petit G, Billon-Galland MA, and Dufour G. 1989. Levels of atmospheric pollution by man-made mineral fibres in buildings. *IARC Sci. Publ.* (90): 291-298.
- GAY D. 1991. *Matériaux composites*. Paris: 3ème édition. Hermès.
- Goldberg M, Imbernon E, Rolland P, Gilg S, I, Saves M, de QA, Frenay C, Chamming's S, Arveux P, Boutin C, Launoy G, Pairon JC, Astoul P, Galateau-Salle F, and Brochard P. 2006. The French National Mesothelioma Surveillance Program. *Occup. Environ. Med.* 63 (6): 390-395.
- GPIC. 2008. Le Groupement de la Plasturgie Industrielle et des Composites: La filière des composites. www.gpic.fr
- Graa Thomsen K, and Soderlund E. 1995. Health Effects of Selected Chemicals: 3. Phenol Formaldehyde Resin. *Nord*, vol 28, 153-73.
- Guillon D, and Lamanche J. 1995. Fibres de verre de renforcement. Techniques de l'ingénieur. Référence A2-110
- Gustafson T, Uhlman-Hoglund A, Nilsson K, Strom K, Tornling G, and Toren K. 2007. Occupational exposure and severe pulmonary fibrosis. *Respir. Med.* 101 (10): 2207-2212.
- Gustavsson P, Jakobsson R, Johansson H, Lewin F, Norell S, and Rutkvist LE. 1998. Occupational exposures and squamous cell carcinoma of the oral cavity, pharynx, larynx, and oesophagus: a case-control study in Sweden. *Occup. Environ. Med.* 55 (6): 393-400.
- Hertzberg T, Tuovinen H, and Blomqvist P. 2005. Measurement of thermal properties at elevated temperatures – Brandforsk project 328-031.
http://www.svbf.se/A1_Omoss/Bilder/BF05_rapport_702_041.pdf

- Hodgson JT, and Darnton A. 2000. The quantitative risks of mesothelioma and lung cancer in relation to asbestos exposure. *Ann Occup Hyg* 44 (8): 565-601.
- HSE. 1998. Health and Safety Executive: Fibres in air. Guidance on the discrimination between fibre types in samples of airborne dust on filters using microscopy. Methods for the Determination of Hazardous Substances, No. 87. 16 p.
- IARC. 1988. International Agency for Research on Cancer: Man-made Fibers and Radon. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans. ed IARC press. Lyon. France
- IARC 2002. International Agency for Research on Cancer: Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Man-made vitreous fibres. Ed IARC press. Lyon . France
- INRS. 2008. Institut National de Recherche et de Sécurité Les fibres. [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Dossier%20Fibres/\\$File/print.html](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/Dossier%20Fibres/$File/print.html)
- Inserm. 1997. Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale: Effets sur la santé des principaux types d'exposition à l'amiante. Expertise collective.
- Inserm 1999. Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale: Effets sur la santé des fibres de substitution à l'amiante. Expertise collective.
- IPCS / WHO. 2000. International Programme on Chemical Safety/World Health Organisation: WHO air quality guidelines for Europe, 2nd edition, 2000 (CD ROM version). http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_4
- ISO 10312. 1995. Ambient air: Determination of asbestos fibres – Direct transfer transmission electron microscopy procedure., and issued 1995.
- Jacob TR, Hadley G, and Eastes W. 1992. Airborne glass fiber concentrations during installation of residential insulation., *Am. Ind. Hyg. Assoc. J* (53). 519-523.
- Jaffrey S. 1990. Levels of airborne man-made mineral fibers in U.K. dwellings. 1) Fiber levels during and after installation of insulation. *Atmos Environ*, vol 24A, 133-137.
- Jaffrey S, Rood AP, Llewellyn JW, and Wilson AJ. 1990. Levels of Airborne Man-Made Mineral Fibres in U.K. Dwellings.2) - Fibre Levels During and after some Disturbance of Loft Insulation. *Atmos Environ* 24A (1): 137-141.
- JEC Composites. 2007. Lettre d'information.33
- Johns Manville company. 2008. Illustration du soufflage de laine. www.jm.com
- Karlsson D, Dalene M, Skarping G, and Marand A. 2001. Determination of isocyanic acid in air. *J. Environ. Monit.* 3 (4): 432-436.

- Kauffer E, Vigneron J, and Veissière S. 1990. Matériaux fibreux-Caractéristiques dimensionnelles. Mesures des niveaux de pollution. *INRS, Cahiers de Notes Documentaires*, 1990, 817-823.
- Kauffer E, and Vincent R. 2007. Occupational exposure to mineral fibres: analysis of results stored on colchic database. *Ann Occup Hyg* 51 (2): 131-142.
- Kauppinen T, Toikkanen J, and Pukkala E. 1998. From cross-tabulations to multipurpose exposure information systems: a new job-exposure matrix. *Am J Ind Med* 33 (4): 409-417.
- Kizer KW, Garb LG, and Hine CH. 1984. Health effects of silicon tetrachloride. Report of an urban accident. *J. Occup. Med.* 26 (1): 33-36.
- Klingholz R. 1977. Technology and production of man-made mineral fibres. *Ann. Occup. Hyg.* 20 (2): 153-159.
- Knauf insulation. 2008. www.knaufinsulation.fr
- Luce D, Leclerc A, Begin D, Demers PA, Gerin M, Orlowski E, Kogevinas M, Belli S, Bugel I, Bolm-Audorff U, Brinton LA, Comba P, Hardell L, Hayes RB, Magnani C, Merler E, Preston-Martin S, Vaughan TL, Zheng W, and Boffetta P. 2002. Sinonasal cancer and occupational exposures: a pooled analysis of 12 case-control studies. *Cancer Causes Control* 13 (2): 147-157.
- Maeyaert G. 2007. Europe's glass fibre association celebrates 20 years. *Reinforced Plastics* 51 (6): 16-24.
- Manius GJ, Wen LF, and Palling D. 1993. Three approaches to the analysis of trace formaldehyde in bulk and dosage from pharmaceuticals. *Pharm. Res.* 10 (3): 449-453.
- Marconi A, Corradetti E, and Mannozi A. 1987. Concentrations of man-made vitreous fibers during installation of insulation materials aboard ships at Ancona naval dockyards. *Ann Occup Hyg* 31 (4B): 595-599.
- Martinon L, Billon-Galland MA, Vallentin F, and Brochard P. Rapport 1996. Contribution à l'étude de l'exposition des citoyens aux particules atmosphériques inhalables: Etude qualitative et quantitative de la pollution de fond urbaine par les fibres d'amiante et par les fibres minérales artificielles.
- Marutzky R, Meyer B, and Schwartz A. 1993. Formaldehyde emissionen aus Mineralwolle-Dämmstoffen. *ZBI/Arbeitsmed* vol 43. 334-338.
- McCrone WC. 1974. Detection and identification of asbestos by microscopical dispersion staining. *Environ. Health Perspect.* 9: 57-62.

- Miller ME, Lees PSJ, and Breysse P.N. 1995. A comparison of airborne man made vitreous fiber concentrations before and after installation of insulation in new construction housing., *Appl. Occup. Environ. Hyg.* vol 10.182-187.
- Montelius J, National Institute for Working Life S, and Arbete och Hålsa. 2005. Scientific Basis for Swedish Occupational Standards. XXV: Consensus report for: Synthetic Inorganic Fibers. *Ed. Johan Montelius.*
[://gupea.ub.gu.se/dspace/bitstream/2077/4352/1/ah2005_07.pdf](http://gupea.ub.gu.se/dspace/bitstream/2077/4352/1/ah2005_07.pdf)
- Moore MA, Boymel PM, Maxim LD, and Turim J. 2002. Categorization and nomenclature of vitreous silicate wools. *Regul Toxicol Pharmacol* 35 (1): 1-13.
- MSI. 2006. Marketing Research for Industry Étude : Rapport sur le Marché de l'Isolation Thermique en France.
- Navy Environmental Health Center. 1997. Man - Made Vitreous Fibers. ed VU Norfolk.
www.nehc.med.navy.mil/Downloads/IH/MMVF.pdf
- NEHC. 1997. US Navy Environmental Health Center, Man-made Vitreous Fibres, Technical Manual NEHC.
- Nelson DI, Concha-Barrientos M, Driscoll T, Steenland K, Fingerhut M, Punnett L, Pruss-Ustun A, Leigh J, and Corvalan C. 2005. The global burden of selected occupational diseases and injury risks: Methodology and summary. *Am J Ind Med* 48 (6): 400-418.
- Nielsen GD, Hammer M, and Hansen LF. 1997. Chemical and Biological Evaluation of Building Material Emissions. III. Screening of a Low-Emitting Fibrous Acoustic Insulation Material. *Indoor Air* 7 (1): 33-40.
- Nielsen O. 1987. Man-made Mineral Fibres in the Indoor Environment caused by Ceilings of Man-made Mineral Wool. Berlin, Institute for Water, Soil and Air Hygiene. Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Berlin
- NIOSH. 1994. National Institute for Occupational Safety and Health: Fibers, Method 7400. In *In NIOSH Manual of Analytical Methods*, 3rd ed. Pub. No. 79-127;.
- Norme EN 13162. 2001. Produits isolants thermiques pour le bâtiment - Produits manufacturés en laine minérale - Spécification.
- Owens Corning. 2008. Audition de Owens -Corning par l'Afsset et mise à disposition d'éléments d'information.
- Petit-Moussaly S, Lebacle C, Vincent R, Guimont M, and Roos F. 2002. Les fibres de carbone et de graphite. Éléments pour une évaluation du risque. *Documents pour le médecin du travail*, vol 92. 353-368.
- Pohlabein H, Jockel KH, Bruske-Hohlfeld I, Mohner M, Ahrens W, Bolm-Audorff U, Arhelger R, Romer W, Kreienbrock L, Kreuzer M, Jahn I, and Wichmann HE. 2000. Lung

- cancer and exposure to man-made vitreous fibers: results from a pooled case-control study in Germany. *Am. J. Ind. Med.* 37 (5): 469-477.
- Rindel A, Hugod C, Bach E, and Breum NO. 1989. Effect on health of man-made mineral fibres in kindergarten ceilings. *IARC Sci Publ.* Vol 90., 449-453.
- RISE. 2003. Réseau Intersyndical de Sensibilisation à l'Environnement : remplacer l'amiante, nouveaux matériaux, nouveaux risques. <http://www.rise.be/frame1.html>
- Rodelsperger K, Jockel KH, Pohlabein H, Romer W, and Weitowitz HJ. 2001. Asbestos and man-made vitreous fibers as risk factors for diffuse malignant mesothelioma: results from a German hospital-based case-control study. *Am J Ind Med* 39 (3): 262-275.
- Rolland P, Orlowski E, Ducamp S, Audignon-Durand S, Brochard P, and Goldberg M. 2005. Base de données EVALUTIL – Evaluation des expositions professionnelles aux fibres. etudes.isped.u-bordeaux2.fr/evalutil003/
- Rood AP. 1988. Size distribution of airborne ceramic fibres as determined by transmission electron microscopy. *Ann Occup Hyg* 32 (2): 237-240.
- Roos F, Guimon M, and Vincent R. 2003. Les fibres d'aramide: éléments pour l'évaluation des risques. *Documents pour le médecin de travail.* 295-306. [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/tc%2094/\\$file/tc94.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/intranetobject-accesparreference/tc%2094/$file/tc94.pdf)
- RPA. 2006. RPA Risk and Policy Analysts Ltd: Comprehensive study on Markets, legislation and safer alternatives for Man-made Vitreous Fibres. Part I: Refractory Ceramic Fibres and Special Purpose Glass Fibres.
- RPA. 2007. Risk and Policy Analysts Limited: Study on Markets, Legislation and Alternatives for Man-made Vitreous Fibres: Part II: Insulation Wools (Glass Wool, Rock Wool and Slag Wool) and Continuous Glass Filaments.
- Saint Gobain. 2007. Laines minérales: Saint Gobain Isover. <http://www.saint-gobain.com/>
- Saint-Gobain VetrotexDeutschlan GmbH. 2002. E, R and D Glass Properties. www.saint-gobainvetrotex.com/market_appli/composites2.htm.
- Saint-Gobain VetrotexInternational S.A. 2001. Composites - The Components. Chambéry, France. www.saint-gobainvetrotex.com/market_appli/composites2.htm
- Saint-Gobain VetrotexInternational S.A. 2008. Fabrication Processes. www.saint-gobainvetrotex.com/fabrication/fabrication.html.
- Schneider T. 1986. Manmade mineral fibers and other fibers in the air and settled dust. *Environ. International* 12: 61-65.
- Schneider T, and Lundqvist GR. 1986. Man-made mineral fibres in the indoor, non-industrial environment., *Scand. J. Work Environ. Health* (10) 129-133.

- Schneider T, Nielsen O, Bredsdorff P, and Linde P. 1990a. Dust in buildings with man-made mineral fiber ceiling boards. *Scand. J. Work Environ. Health* 16 (6): 434-439.
- Schneider. 1990. Dust in buildings with man-made mineral fiber ceiling boards. *Scand. J. Work Environ. Health* 16 (6): 434-439.
- Spurny KR, and Stöber W. 1981. Some aspects of analysis of single fibers in environmental and biological samplest. *Environ. International*, (8) 265-281.
- Stauder F. 2004. Les matériaux textiles dans le bâtiment et le génie civil. ARIST Champagne Ardennes; Agences Régionales d'Information Stratégique et technologique; CRCI Chambre régionale de commerce et d'industrie Champagne Ardennes.
www.miditech.net/download.asp?download=stockfile/nid_361/mtt/fichestechniques/Fiche3_textilebatiment.pdf
- Steenland K, Burnett C, Lalich N, Ward E, and Hurrell J. 2003. Dying for work: The magnitude of US mortality from selected causes of death associated with occupation. *Am. J. Ind. Med.* 43 (5): 461-482.
- Switala ED, Harlan RC, Schlaudecker DG, and Bender JR. 1994. Measurement of respirable glass and total fiber concentrations in the ambient air around a fiberglass wool manufacturing facility and a rural area. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*; vol 20 n°3 S76-S88.
- Thierne B, Sobottka A, Willer A, and Weidhasse J. 1996. Man-made mineral fiber boards in buildings-health risks caused by quality deficiencies. *Indoor air*, 299-303.
- Tibloux A. 2002. Livre blanc du FILMM : Production, application des laines minérales réglementation, niveaux d'exposition.
- Tiesler H, and Draeger U. 1993. Measurement and identification of insulation product-related fibres in contrast to ubiquitous fibres. In *Indoor Air: Indoor Air*, ed PJMSO In: Kalliokoski, 27-31. Helsinki, Jyväskylä, Finland, Gummerus.
- Tiesler H, Achenbach G, Kuhn PJ, Gollmer H, and Johannes KH. 1983. [Formaldehyde emission from mineral-fiber insulating materials]. *Zentralbl. Arbeitsmed. Arbeitsschutz. Prophyl. Ergonomie.* 33 (7): 222-226.
- Tiesler H, Draeger U, and Rogge D. 1993. Emission of fibrous particles from installed insulation mineral wool products. In *Indoor Air, 1993 Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, ed JFGO Helsinki, 27-31. in: Kalliokoski, P., Jantunen, M. Seppänen, O.
- TIMA. 1991. Thermal Insulation Manufacturers Association: Man-Made Vitreous Fibers: Nomenclature, Chemical and Physical Properties.
- TNO. 1994. Onderzoek naar de oorzaak van stankklachten in twee woningen aan de vergulde wagen te diemen. <http://www.tno.nl/index.cfm>

- Toren K, Balder B, Brisman J, Lindholm N, Lowhagen O, Palmqvist M, and Tunsater A. 1999. The risk of asthma in relation to occupational exposures: a case-control study from a Swedish city. *Eur. Respir. J.* 13 (3): 496-501.
- URSA. 2008. Catalogue Produits Polystyrène extrudé Doc guide extru Avril_07. www.ursa.fr
- Van der Wal JF, Ebens R, and Templeman J. 1987. Man-made mineral fibres in homes caused by thermal insulation. *Atmospheric Environment* (21) 13-19.
- VDI. 1994. Indoor air pollution measurement. Measurement of inorganic fibrous particles. Measurement planning and procedure. Scanning electron microscopy. VDI 3492, part 2.
- Verma DK, and Clark NE. 1995. Relationships between Phase Contrast Microscopy and Transmission Electron Microscopy results of samples from occupational exposure to airborne chrysotile asbestos. *Am Ind Hyg Assoc J* 56: 866-873.
- Vincent R, and Jeandel B. 2001. COLCHIC-occupational exposure to chemical agents database: current content and development perspectives. *Appl Occup Environ Hyg* 16 (2): 115-121.
- Vincent R, Kauppinen T, Toikkanen J, and Pedersen D. 1999. Carex. Système international d'information sur l'exposition professionnelle aux agents cancérigènes en Europe. Résultats des estimations pour la France pendant les années 1990-1993. *Hygiène et Sécurité au Travail* 176.
- Wallenberger FT, Watson JC, and Li H. 2000. Glass fibers. Ed I PPG Industries ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
[://www.asminternational.org/Template.cfm?Section=ShopASM&template=Ecommerce/FileDisplay.cfm&file=ACF7D8.pdf](http://www.asminternational.org/Template.cfm?Section=ShopASM&template=Ecommerce/FileDisplay.cfm&file=ACF7D8.pdf)
- WHO. 1985. World Health Organization: Technical Committee for monitoring and evaluating airborne MMMF, Reference methods for measuring airborne Man-Made Mineral Fibres (MMMF). *WHO Ed.*
- WHO. 1997. World Health Organization Determination of airborne fibre number concentrations. A recommended method, by phase-contrast optical microscopy (membrane filter method). Geneva: World Health Organization (WHO).
- WHO. 2007. World Health Organization: The effectiveness of health impact assessment. Scope and limitations of supporting decision-making in Europe.: Cromwell Press.



))) **afsset** .)))

agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail

253, avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
Tél. +33 1 56 29 19 30
afsset@afsset.fr
www.afsset.fr

ISBN 978-2-11-097831-8

