

Gestion de la fin de vie des matériaux à base d'amiante et autres matériaux fibreux

Revue internationale des différents procédés de traitement



C4H5O2_5 2/ 9/99 THERMC 4H 50 2 0G 300.000 5000.000 1392.000 1
1.64121890E+01 1.20184883E-02-4.40468566E-06 7.30124728E-10-4.42784365E-14 2

**GESTION DE LA FIN DE VIE DES MATERIAUX A BASE
D'AMIANTE ET AUTRES MATERIAUX FIBREUX**

**REVUE INTERNATIONALE DES DIFFERENTS
PROCEDES DE TRAITEMENT**

RAPPORT FINAL

mai 2016

V. NOUVEL, J.-P. PARISI – Groupement EVIDENCE – ALBA Conseil – MEDIECO Conseil & Formation

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Gestion de la fin de vie des matériaux à base d'amiante et autres matériaux fibreux. Revue internationale des différents procédés de traitement, 2016, 174 p, n°14-0333/1A

© RECORD, 2016

RESUME

Le présent document constitue le **rapport final** de l'étude RECORD n°14/0333/1A relative à la réalisation d'une revue des gisements et des différents procédés de traitement en fin de vie des matériaux à base de fibres minérales naturelles (FMN), tout particulièrement d'amiante et de fibres minérales artificielles (FMA).

L'étude procède dans un premier temps à une analyse des **risques pour la santé** des matériaux fibreux dans le cadre de la phase de gestion de la fin de vie de ces matériaux.

Dans un deuxième temps, une analyse critique de procédures de **désamiantage et déconstruction d'ouvrages et d'équipements** est réalisée.

Ces deux étapes permettent la définition **des flux de matériaux fibreux en fin de vie à traiter** et conduisent au cœur de l'étude : la **revue critique prospective des technologies de traitement des déchets amiantifères et des autres matériaux FMA** qui comporte :

- ✓ Une présentation synthétique des différentes voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie,
- ✓ Une cartographie complète des procédés de traitement de matériaux fibreux contenant de l'amiante et des autres matériaux fibreux,
- ✓ L'identification de 11 procédés existants et brevets en cours de développement,
- ✓ Une présentation détaillée et critique des technologies les plus prometteuses.

En outre, l'étude propose au fil de sa progression des **pistes de réflexion pour conduire des travaux de recherche et développement** tant sur la réalisation des opérations de désamiantage et déconstruction des ouvrages et équipements que sur les voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie.

MOTS CLES

DECHET, FIBRES MINERALES NATURELLES, FIBRES MINERALES ARTIFICIELLES, AMIANTE, DECONSTRUCTION, SANTE, ENVIRONNEMENT, FIN DE VIE, PROCEDES TERMQUES, PROCEDES DE CONVERSION THERMO CHIMIQUE.

SUMMARY

This document is a summary of the **final report** of the RECORD No 14/0333 / 1A study regarding a review of the deposits and the different end of life treatment processes of materials based on natural mineral fibers (NMF), and particularly asbestos and artificial mineral fibers (AMF).

The study proceeds initially to an analysis of the **health risks** related to fibrous materials and in the context of the end of life management phase of these materials.

In a second stage, a critical analysis of **asbestos removal procedures and deconstruction of structures and equipment** is carried out.

These two phases enable the definition of the different **flows of end of life fibrous materials to treat** and lead to the heart of the study: The **prospective critical review of asbestos waste treatment technologies and other AMF materials** that includes:

- ✓ A summary presentation of the different technological processing channels for end of life fibrous materials,
- ✓ A complete mapping of fibrous material treatment processes containing asbestos and other fibrous materials,
- ✓ The identification of 11 existing processes and patents that are currently being developed,
- ✓ A detailed and critical presentation of the most promising technologies.

In addition, throughout its progress, the study offers lines of approach about conducting research and development both in the operations of asbestos removal and demolition of structures and in the technological processing channels of end of life fibrous materials.

KEY WORDS

WASTE, NATURAL MINERAL FIBERS, ARTIFICIAL MINERAL FIBERS, ASBESTOS, DECONSTRUCTION, HEALTH, ENVIRONMENT, END OF LIFE, THERMAL PROCESSES, THERMO CHEMICAL CONVERSION PROCESSES.

SOMMAIRE

0. Introduction	20
1. Première partie Synthèse des risques pour la santé humaine des déchets de matériaux contenant des fibres minérales naturelles ou artificielles	21
1.1. Objectifs et contenu de la synthèse des risques.....	22
1.2. Classification des fibres	23
1.3. Bases pour la caractérisation des risques sanitaires des fibres	24
1.4. Toxicité des fibres minérales	24
1.4.1. Critères généraux de toxicité des fibres	24
1.4.1.1. La forme « fibre »	24
1.4.1.2. La taille des fibres	24
1.4.1.3. La structure des fibres.....	25
1.4.1.4. La biopersistance des fibres	25
1.4.2. Toxicité des fibres minérales naturelles (FMN) - L'amiante	26
1.4.2.1. Facteurs de toxicité spécifique des fibres d'amiante	26
1.4.2.1.1. Structure cristalline et fragmentation longitudinale	26
1.4.2.1.2. Biopersistance.....	27
1.4.2.1.3. Autres facteurs	27
1.4.2.2. Effets sanitaires des fibres d'amiante.....	28
1.4.2.2.1. Fibrose pulmonaire et pleurale.....	28
1.4.2.2.2. Cancer de divers organes : poumon, plèvre, péritoine, larynx et ovaires	28
1.4.3. Toxicité des fibres minérales artificielles (FMA).....	29
1.4.3.1. Facteurs de toxicité spécifique des FMA	29
1.4.3.1.1. Structure vitreuse et composition chimique.....	29
1.4.3.1.2. Caractéristiques dimensionnelles	30
1.4.3.1.3. Biopersistance.....	30
1.4.3.2. Effets sanitaires des FMA	31
1.4.3.2.1. Pas de risque accru de cancer pour les fibres de laines de verre, de roche et de laitier non biopersistantes.....	31
1.4.3.2.2. Les FCR, potentiel cancérigène supposé	32
1.4.3.2.3. Les fibres de verre de type E et 475, potentiel cancérigène supposé	32

1.5. Évaluation et limitation de l'exposition aux fibres minérales	34
1.5.1. Fibres minérales naturelles. Amiante.....	34
1.5.1.1.1. Valeurs limites d'exposition.....	34
1.5.1.1.2. Niveaux d'exposition.....	34
1.5.2. Fibres minérales artificielles : laines de verre, de roche, de laitier.....	35
1.5.2.1.1. Valeurs limites d'exposition.....	35
1.5.2.1.2. Niveaux d'exposition.....	35
1.5.3. Fibres minérales artificielles : Fibres céramiques réfractaires	36
1.5.3.1.1. Valeurs limites d'exposition.....	36
1.5.3.1.2. Niveaux d'exposition.....	36
1.5.4. Fibres minérales artificielles : Fibres de verre à usage spécial	37
1.5.4.1.1. Valeurs limites d'exposition.....	37
1.5.4.1.2. Niveaux d'exposition.....	37
1.6. Gestion des risques sanitaires des déchets de FMN et FMA.....	38
1.6.1. Aspects réglementaires	38
1.6.1.1. Déchets dangereux / déchets non dangereux	38
1.6.1.2. Responsabilité des déchets.....	39
1.6.2. Fibres d'amiante.....	40
1.6.2.1. Des déchets dangereux	40
1.6.2.2. Limiter l'exposition humaine aux fibres d'amiante.....	42
1.6.3. Fibres de laine de verre, de roche et de laitier	42
1.6.4. Fibres céramiques réfractaires.....	43
1.6.5. Fibres de verre à usage spécial.....	44
1.7. La gestion des risques sanitaires liés à une contamination des eaux par des fibres provenant de matériaux contenant de l'amiante	44
1.7.1. Problématique des canalisations en amiante-ciment.....	45
1.7.1.1. Contexte français	45
1.7.1.2. Risque de contamination de l'eau potable ?.....	47
1.7.2. Problématique des matériaux de toiture en amiante-ciment.....	48
1.7.3. Ingestion d'eau potable contaminée par l'amiante : effets sur la santé	48
1.7.3.1. Etudes épidémiologiques	48

1.7.3.2.	Etudes sur l'exposition à l'amiante par ingestion (ou contamination de l'eau) ...	48
1.7.3.2.1.	Etudes animales	48
1.7.3.2.2.	Avis des institutions officielles.....	48
2.	Deuxième partie : Revue critique des procédures de déconstruction d'ouvrages et d'équipements à l'origine de productions de déchets amiantifères et de déchets de matériaux FMA en général.....	50
2.1.	Objectifs de la revue critique des opérations de déconstruction	51
2.2.	Démarche méthodologique	52
2.3.	Opération de déconstruction totale d'un site industriel : équipements et bâtiments	52
2.3.1.	Caractéristiques des ouvrages déconstruits	53
2.3.2.	Chronologie du chantier de déconstruction	55
2.3.3.	Diagnostic amiante	56
2.3.4.	Diagnostic déchets préalable	58
2.3.5.	Caractéristiques des marchés de maîtrise d'œuvre et de travaux.....	58
2.3.6.	Intervenants du chantier	59
2.3.7.	Procédures de déconstruction et de traitement mises en œuvre	59
2.3.8.	Aspects santé et sécurité spécifiques liés aux procédures de déconstruction mises en œuvre	60
2.4.	Opération de déconstruction d'équipements	61
2.4.1.	Méthodologie de désamiantage.....	61
2.4.2.	Méthodologie d'identification des zones amiantées	62
2.4.3.	Les différents procédés de désamiantage testés par SME	62
2.4.3.1.	Cryogénie	63
2.4.3.2.	Hydro décapage	63
2.4.3.3.	Grenailage	63
2.4.3.4.	Produits chimiques	63
2.4.4.	Gestion des déchets et données économiques.....	63
2.4.5.	Aspects réglementaires	64
2.4.5.1.	L'installation	64
2.4.5.2.	Le personnel.....	64
2.4.5.3.	Les déchets	64

2.4.6.	Développement de la filière	65
2.4.7.	Focus sur le désamiantage des pièces métalliques	65
2.5.	Opération de déconstruction d'un site tertiaire complexe : siège du Crédit Agricole de Nantes	66
2.5.1.	Caractéristiques des ouvrages déconstruits	67
2.5.2.	Diagnostic amiante	68
2.5.3.	Diagnostic déchets préalable	68
2.5.4.	Apports des caractéristiques des marchés de travaux à l'optimisation des quantités de déchets amiantés produites.....	68
2.5.5.	Procédures de déconstruction et de traitement mises en œuvre	69
2.5.6.	Aspects santé et sécurité spécifiques liés aux procédures de déconstruction mises en œuvre	70
2.6.	Autre opération de déconstruction totale d'un site tertiaire : bâtiment usuel de bureaux	71
2.6.1.	Caractéristiques des ouvrages déconstruits	71
2.6.2.	Chronologie du chantier de déconstruction	72
2.6.3.	Diagnostic amiante	73
2.6.4.	Diagnostic déchets préalable	73
2.6.5.	Caractéristiques des marchés de maîtrise d'œuvre et de travaux.....	73
2.6.6.	Intervenants du chantier	73
2.6.7.	Procédures de déconstruction et de traitement	73
2.7.	Pont d'actualité sur projet DEMOCLES.....	75
2.8.	Éléments de compréhension de la problématique granulats amiantes de Travaux Publics.....	76
2.8.1.	Constats	76
2.8.2.	Aspects réglementaires	77
2.8.3.	Etat actuel des réflexions liés à la problématique « travaux de voirie et actinolite »	79
2.9.	Synthèse de l'analyse des problématiques de désamiantage et déconstruction réalisées en amont des opérations de traitement de déchets de matériaux amiantés.....	81
3.	Troisième partie : Revue critique des procédés de traitement des déchets amiantifères et de déchets de matériaux FMA en général	84
3.1.	Présentation synthétique des voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie	85
3.1.1.	Notions de chimie minérale et propriétés physico chimique de l'amiante.....	85

3.1.1.1.	Définitions et généralités	85
3.1.1.2.	Structure physico-chimique de l'amiante	86
3.1.1.3.	Propriétés physico-chimiques des différents types d'amiante.....	89
3.1.2.	Comportement de l'amiante vis-à-vis des différents modes de traitement	90
3.1.2.1.	Traitement thermique.....	91
3.1.2.1.1.	Fusion	91
3.1.2.1.2.	Déshydratation	91
3.1.2.2.	Traitements thermochimiques.....	92
3.1.2.2.1.	Réaction aux acides	92
3.1.2.2.2.	Réaction aux bases fortes	93
3.1.2.2.3.	Réactions aux agents minéralisants (transformation minéralogique).....	93
3.1.2.2.3.1.	Exemple des silicates alcalins	94
3.1.2.2.3.2.	Autres agents minéralisants	94
3.1.2.3.	Procédés et réactifs permettant d'améliorer la cinétique et le rendement des réactions de déstructuration de l'amiante	95
3.1.2.3.1.	Procédés chimiques.....	95
3.1.2.3.1.1.	Agents Tensio-actifs	95
3.1.2.3.1.2.	Agents complexants des métaux.....	95
3.1.2.3.2.	Fondants.....	96
3.1.2.3.2.1.	Exemple des composés calciques	97
3.1.2.3.2.2.	Exemple des composés chlorés	97
3.1.2.3.3.	Catalyseurs.....	97
3.1.2.3.4.	Utilisation d'H ₂ O ₂	98
3.1.2.4.	Procédés mécaniques.....	98
3.1.2.4.1.	Broyage.....	98
3.1.2.4.2.	Malaxage.....	98
3.1.2.4.3.	Pressage / Frittage	98
3.1.2.5.	Autres procédés.....	99
3.1.2.5.1.	Ultrasons	99
3.1.2.5.2.	Traitement par micro-ondes.....	99
3.1.2.5.3.	Décharge plasma.....	99

3.1.2.6.	Fabrication du ciment / procédé de clinkerisation	99
3.1.3.	Autres procédés de traitement de l'amiante	101
3.1.3.1.	La Carbonatation minérale.....	101
3.1.3.2.	Réaction de carbonatation par voie humide	101
3.1.3.3.	Réaction de carbonatation par voie sèche.....	101
3.1.3.4.	Oxydation hydrothermale / eau supercritique	102
3.1.3.5.	Co-destruction avec des CFC.....	102
3.2.	Aspects réglementaires liés au traitement des déchets de matériaux fibreux contenant de l'amiante	102
3.3.	Analyse critique et sélection des brevets – matériaux fibreux en fin de vie contenant de l'amiante	109
3.3.1.	Démarche d'identification des procédés.....	109
3.3.2.	Analyse quantitative.....	110
3.3.2.1.	Origine des déposants.....	110
3.3.2.2.	Concentration des brevets	111
3.3.2.3.	Historique des publications.....	112
3.3.2.4.	Classification.....	112
3.3.2.5.	Analyse qualitative.....	113
3.3.2.5.1.	Pré-traitement (Solidification / encapsulage).....	113
3.3.2.5.2.	Procédés chimiques : traitement acide à froid.	114
3.3.2.5.3.	Traitement par agent réducteur et broyeur à impact	114
3.3.2.5.4.	Procédés Thermiques :	115
3.3.2.5.4.1.1.	Fusion	115
3.3.2.5.4.1.2.	Déshydratation.....	116
3.3.2.5.4.2.	Procédés Thermochimiques	116
3.3.3.	Analyse critique des brevets sélectionnés	116
3.3.3.1.	Procédé SUMITOMO OSAKA CEMENT Co Ltd	117
3.3.3.2.	Procédé TECHME	117
3.3.3.3.	Procédé Carpena / Lacout (CNRS)	118
3.3.3.4.	Procédé ARI-TECHNOLOGIES.....	118
3.3.3.4.1.	Historique et présentation	118

3.3.3.4.2.	Référence des brevets	118
3.3.3.4.3.	Description du procédé (installation fixe)	119
3.3.3.4.4.	Données économiques	122
3.3.3.5.	Procédé ATON HT	123
3.3.3.5.1.	Historique	123
3.3.3.5.2.	Référence du brevet	124
3.3.3.5.3.	Description du procédé.....	124
3.3.3.5.4.	Données économiques	126
3.3.3.6.	Procédé NEO ECO RECYCLING	127
3.3.3.6.1.	Historique et présentation	127
3.3.3.6.2.	La référence du brevet	127
3.3.3.6.3.	Description du procédé :.....	127
3.3.3.7.	Procédé VALMIANTE (Valorisation Zeolite).....	133
3.3.3.7.1.	Historique et présentation	133
3.3.3.7.2.	Description du procédé.....	133
3.3.3.7.3.	Données économiques	135
3.3.3.8.	Procédé INERTAM.....	135
3.3.3.8.1.	Informations générales sur la société :.....	135
3.3.3.8.2.	Production et autres chiffres :.....	136
3.3.3.8.3.	Procédé.....	136
3.3.3.8.4.	Description du procédé.....	137
3.3.3.8.5.	Projets, Développements.....	138
3.3.4.	Synthèse de l'analyse des procédés de traitement des matériaux fibreux contenant de l'amiante	139
3.4.	Analyse critique et sélection des brevets – autres matériaux fibreux en fin de vie 143	
3.4.1.	Généralités	143
3.4.1.1.	Les catégories de FMA et leur utilisation.....	143
3.4.1.2.	Propriétés physico-chimiques des FMA	143
3.4.2.	Identification des brevets	144
3.4.3.	Analyse des procédés de recyclage.....	145

3.4.3.1. Laine de verre.....	145
3.4.3.1.1. Généralités sur les techniques de recyclage des laines de verre.....	145
3.4.3.1.2. Commentaires	145
3.4.3.1.3. Procédé OXYMELT (ISOVER).....	146
3.4.3.1.4. WOOLREC	147
3.4.3.2. Laine de roche.....	147
Programme ROCKCYCLE.....	147
3.4.3.3. Les Fibres Céramiques réfractaires (FCR).....	148
4. Conclusion et perspectives	149
4.1 Principaux enseignements	149
4.2 Perspectives.....	156
ANNEXES	158

PREAMBULE A LA LECTURE DU RAPPORT

GESTION DES MATERIAUX FIBREUX EN FIN DE VIE : DE QUOI PARLE-T-ON DANS CETTE ETUDE ?

L'approche générale de l'étude est la suivante :

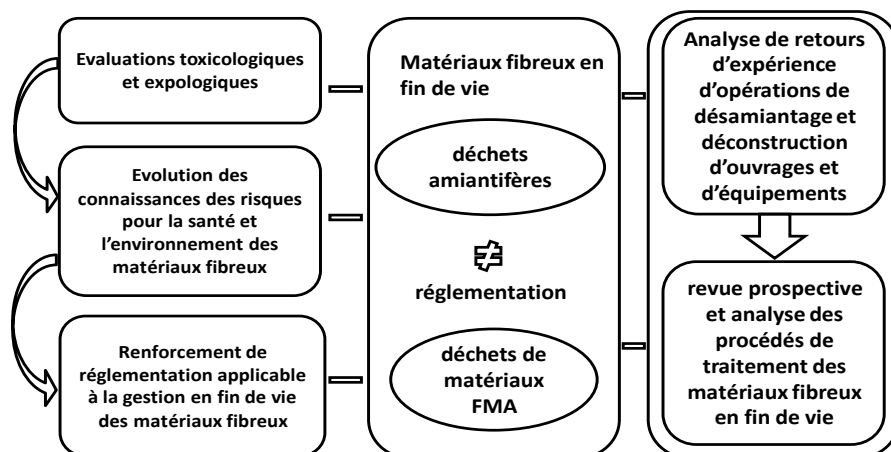


Figure 1 Schéma de l'approche générale de l'étude

Les matériaux fibreux en fin de vie auxquels s'intéresse l'étude sont :

- **Les déchets amiantifères :**

produits contenant des fibres minérales naturelles cristallines de type amiante et « générés par des opérations de désamiantage, en génie civil (flocage, isolation), mais aussi par des opérations de démantèlement d'équipements à base de matériaux contenant de l'amiante (MCA), tels que des dispositifs de filtration, des protections individuelles à base d'amiante, des voitures de train, des déchets de chantiers (matériaux amiante-ciment), etc. »

- **Les déchets de matériaux FMA :**

matériaux constitués de fibres minérales artificielles siliceuses et vitreuses telles que fibre de verre, fibre de roche, fibre céramique réfractaire (FCR), fibre de laitier.

Pour bien comprendre les problématiques traitées à travers cette étude, les caractéristiques principales de ces matériaux fibreux sont rappelées ci-après.

EXISTE-T-IL DIFFERENTES CATEGORIES DE FIBRES ?

Les fibres sont classées selon leur **origine naturelle ou manufacturées, leur composition et leur structure.**

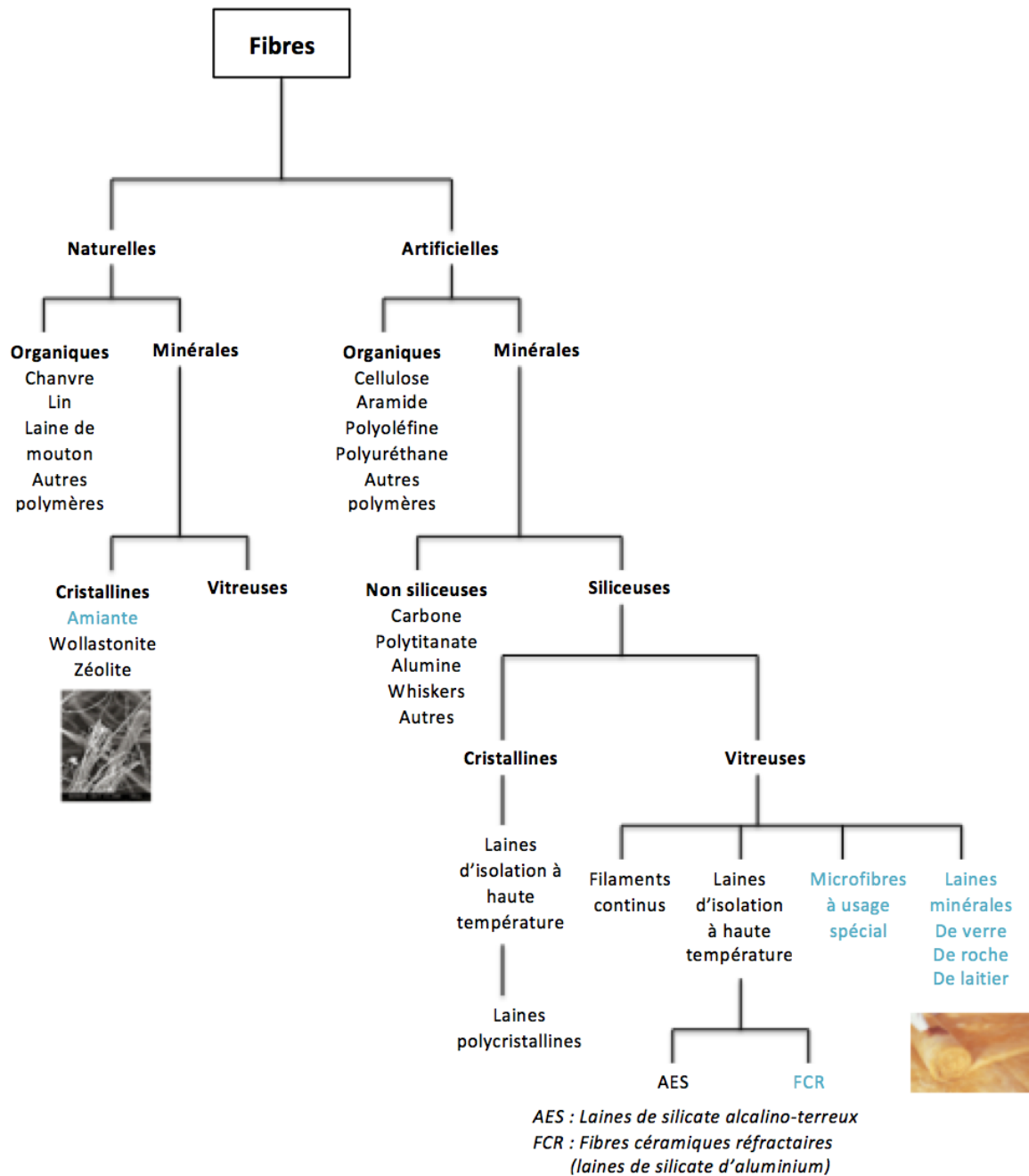


Figure 2 Présentation des différentes familles de fibres (complétée à partir de TIMA, 1991)

L'étude concerne tout particulièrement les fibres naturelles minérales cristallines dont l'amiante et les fibres artificielles minérales, siliceuses et vitreuses dont l'usage le plus important est représenté par les laines minérales d'isolation.

POURQUOI LES FIBRES MINERALES PEUVENT PRESENTER DES RISQUES POUR LA SANTE ?

▪ La forme « fibre »

Les fibres prises en compte d'un point de vue réglementaire, dans les mesures d'air, sont celles définies par l'Organisation mondiale de la santé c'est-à-dire ayant une longueur supérieure à 5 µm et un diamètre inférieur à 3 µm en raison de leur pénétration au sein de l'appareil respiratoire.

La forme "fibre" est un élément pathogénique qui s'est révélé important avec l'amiante.

En raison de cette structure, "toute nouvelle fibre proposée comme substitut à l'amiante ou pour tout autre usage doit être soupçonnée, *a priori*, d'être pathogène" (Rapport INSERM, 1999).

▪ La taille des fibres

La taille des fibres conditionne leur capacité à être inhalées. Le danger est important pour des fibres de petit diamètre et de grande longueur.

Avec un diamètre inférieur à 3 µm, une fibre est dite « respirable », selon la terminologie anglaise. Elle peut se déposer dans le poumon profond (zone alvéolaire) avec le risque de migrer vers la plèvre.

Si le diamètre est supérieur à 3 à 5 µm, la fibre est dite inhalable. Elle se dépose dans le tractus respiratoire, notamment au niveau des bronches et des bronchioles.

Des irritations passagères de la peau, des yeux et des voies respiratoires supérieures peuvent survenir avec les fibres de diamètre plus élevé.

▪ La structure des fibres

Le type d'organisation spatiale de la structure des fibres influe sur la toxicité.

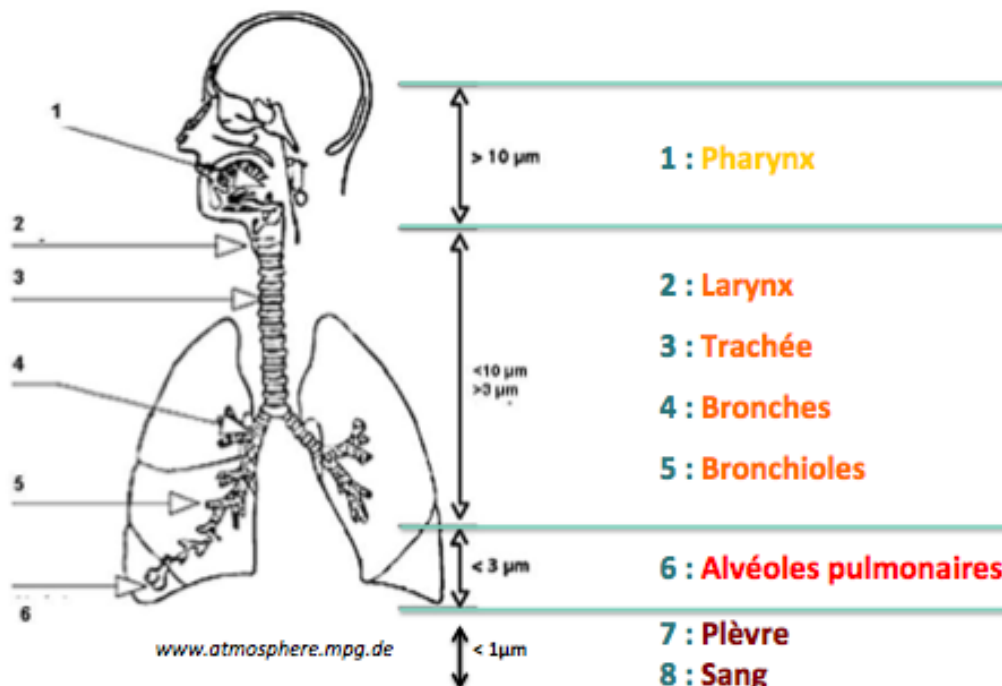


Figure 3 Pénétration dans le système respiratoire selon le diamètre des fibres

Une structure moléculaire cristalline (cas des fibres d'amiante) est un facteur de dangerosité à la différence d'une structure vitreuse (cas des fibres des laines minérales d'isolation) considérée comme peu nocive avec un pouvoir fibrosant limité et une relative solubilité en milieu pulmonaire.

▪ La biopersistance des fibres

La biopersistance pulmonaire est définie comme la durée de rétention des fibres dans le poumon.

Plus elle est longue, plus les risques de modification pathologique de l'épithélium respiratoire et de possibilité de migration dans la plèvre augmentent. Elle dépend des caractéristiques chimiques et physiques des fibres ainsi que des mécanismes d'élimination physiologique du poumon (dissolution, fragmentation, élimination mucociliaire trachéobronchique et action lymphocytaire).

Pour appréhender les facteurs de variation de la toxicité des différentes fibres on retiendra que le potentiel toxique d'une fibre diminue lorsque :

- sa longueur diminue,
- son diamètre augmente,
- sa biopersistance diminue,
- sa solubilité augmente.

QU'EST-CE QUE L'AMIANTE ?

L'amiante est un terme générique pour décrire une variété naturelle de **silicate hydraté** contenant des **minéraux (calcium, fer, magnésium, sodium)** et présentant une **structure cristalline fibreuse**.

Un Silicate hydraté

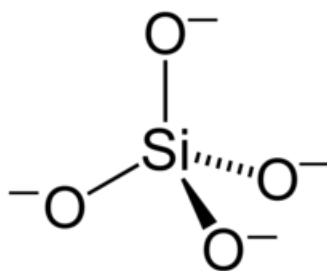


Figure 4 Forme moléculaire du silicate hydraté

Un **silicate** est un minéral structuré à partir d'une unité de base qui est l'ion silicate $[\text{SiO}_4]^{4-}$. On parle du tétraèdre SiO_4 .

Le tétraèdre SiO_4 est extrêmement stable. Seul l'acide fluorhydrique peut dissoudre le squelette silicique en formant des fluoro-silicates hydrosolubles (SiF_4)

On parle de **silicate hydraté** lorsqu'au sein d'un ion silicate, certains atomes d'oxygène sont remplacés par des groupes hydroxyle (OH).










Le groupe ionique SiO_4 possède la particularité de pouvoir constituer des polymères en mettant en commun certains atomes d'oxygène (ou groupe hydroxyle).

Des minéraux

La structure moléculaire des minéraux est constituée d'ions. Au sein d'un minéral la charge totale doit rester neutre.

Lorsque le tétraèdre SiO_4 est isolé sa structure est chargée à -4 . Il y a 2 façons de neutraliser les charges : lier ensemble les tétraèdres par leurs atomes d'oxygène (processus de polymérisation tétraèdre à tétraèdre) et/ou se lier avec des ions positifs tels que Fer (Fe), Magnésium (Mg), Sodium (Na), Calcium (Ca).

Notion de « structure idéale »

ANION (-)	CATIONS (+)			
 O^{2-} $R = 1,40$	Si^{4+}  $R = 0,39$	Al^{3+}  $R = 0,51$		
	Fe^{3+}  $R = 0,64$	Fe^{2+}  $R = 0,74$	Mg^{2+}  $R = 0,66$	
	Na^{1+}  $R = 0,97$	Ca^{2+}  $R = 0,99$	K^{1+}  $R = 1,33$	
$R = \text{rayon ionique en Angstroms } (1\text{\AA} = 10^{-9} \text{ m.m.})$				

Même si chaque composé minéral possède une composition chimique définie, on admet certaines variations dues à la substitution de certains ions par d'autres. Les substitutions d'ions dans les minéraux sont en grande partie contrôlées par la taille et la charge des ions, ce qu'illustre le tableau ci-contre.

Ainsi, il sera facile de faire des substitutions d'ions de taille et de charge semblables, comme de substituer le fer (Fe) au magnésium (Mg), ou le sodium (Na) au calcium (Ca). Le calcium, le sodium et le potassium (K) pourront également se substituer au magnésium sous certaines conditions de température et de pression. En revanche il sera plus difficile de substituer du potassium ou de l'oxygène (O) à l'aluminium (Al).

Figure 5 Tableau comparatif des tailles de cations par rapport à l'anion superoxyde

Structure physico-chimique de l'amiante

L'amiante est issu de 2 familles de minéraux : **les Amphiboles et les Serpentes**.

Toutes les Amphiboles et Serpentes ne sont pas de l'amiante.

Au sein de ces familles, seuls les minéraux ayant **une structure cristalline fibreuse** sont de l'amiante.

Cette structure cristalline, qui détermine la forme et la taille des fibres, est un élément de différenciation important entre l'amiante serpentine (le chrysotile) et les amiantes amphiboles. C'est le mode et le degré de polymérisation des ions silicates qui est à l'origine de la classification des 6 variétés d'amiante :

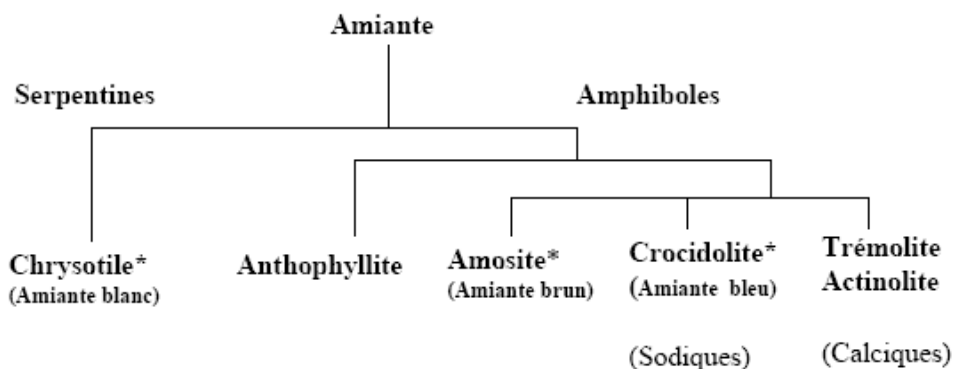


Figure 6 Classement des variétés d'amiante

* variétés d'amiantes d'importance commerciale

L'étude ne s'intéresse qu'aux variétés d'amiantes d'importance commerciale, seules susceptibles d'être présentes dans un déchet amianté : chrysotile (Serpentine), crocidolite et amosite (Amphiboles).

▪ **Structure cristalline du chrysotile :**

Le chrysotile est un silicate hydraté essentiellement de magnésium.

Les cations Si^{4+} ou Mg^{2+} sont entourés d'anions oxygène (O^-) ou hydroxyle (OH^-).

La structure cristalline du chrysotile se présente comme un polymère formé par la superposition en plusieurs feuillets, d'une couche tétraédrique - Te (tétraèdre SiO_4 associés entre eux) associée à une couche octaédrique - Oc dite brucitique en référence à sa structure et à sa composition qui ressemblent à celles de la brucite, minéral d'hydroxyde de magnésium ($Mg(OH)_2$) de forme fibreuse. Dans cette couche brucitique de maille $Mg_3(OH)_6$ deux groupements hydroxyles sur trois sont remplacés par des atomes d'oxygène aux pointes des tétraèdres.

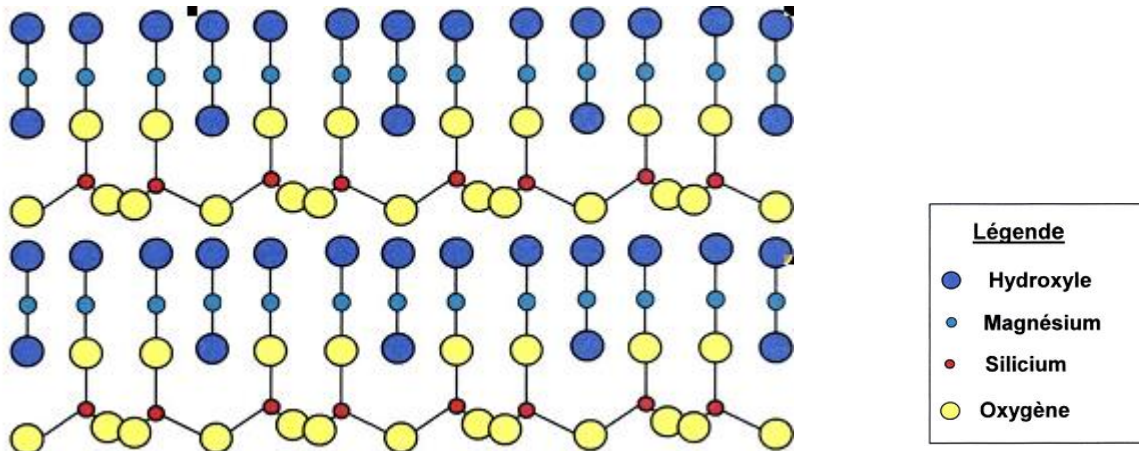


Figure 7 Structure Chimique du chrysotile

En surface du chrysotile, se trouve donc une couche de groupements hydroxyles qui est soutenue par des atomes de magnésium.

Une couche de groupements silicates est liée à la couche brucitique par des atomes d'oxygène. Les deux couches forment un feuillet.

Les anomalies de superposition ainsi que les contraintes internes dues à l'asymétrie entre les couches Te et Oc incurvent les couches jusqu'à former des cylindres appelés fibrilles.

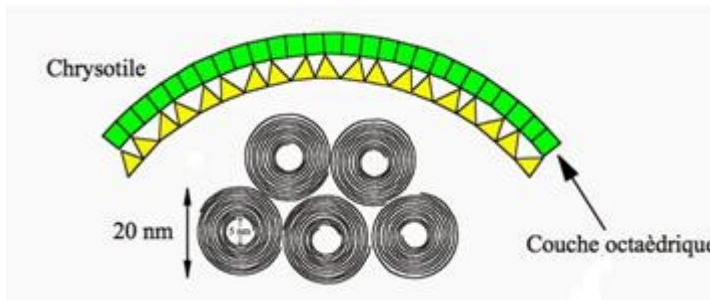


Figure 8 La formation feuillet

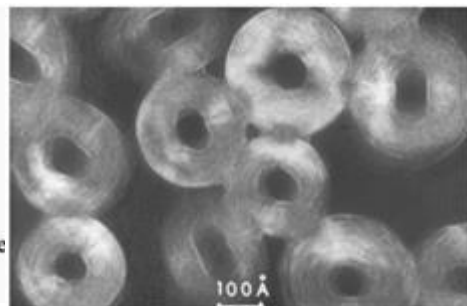


Figure 9 Vue au microscope électronique à transmission, sur une section perpendiculaire à l'axe des fibres

▪ Structure cristalline des amphiboles

Les **amphiboles** sont des **silicates hydratés** auxquels se lieent des cations **Fe et Mg** (Amosite ou amiante brun) ou **Fe et Na** (crocidolite – amiante bleu) qui équilibrent la charge.

La structure cristalline des amphiboles se présente comme un polymère en double chaîne linéaire de tétraèdres SiO_4 (certains atomes d'oxygène étant remplacés par des radicaux hydroxyles).

Ces chaînes doubles (ou rubans) étant liées entre elles par des cations métalliques (Fe/Mg pour l'amosite ; Fe/Na pour le crocidolite... Ca pour les amphiboles calciques.. etc)

Les positions disponibles pour les ions métalliques se trouvent en périphérie et au sommet de la double chaîne.

Deux groupes hydroxyle sont rattachés au cation central et sont **entièrement contenus dans la structure** qui est composée d'un empilement de rubans.

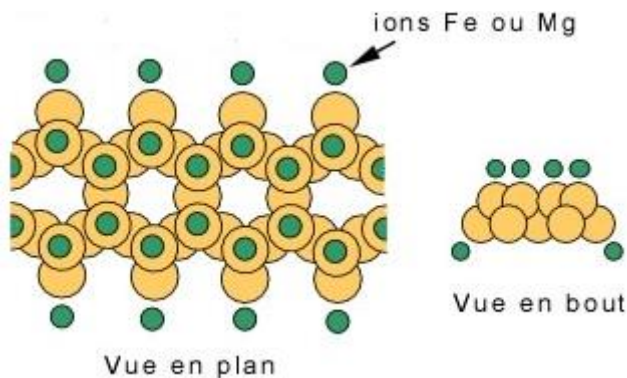


Figure 10 Structure moléculaire des amphiboles

La liaison entre rubans au travers de ces cations métalliques est chimiquement faible et les cristaux montrent facilement un clivage parallèle aux rubans. Contrairement au chrysotile, les amphiboles ne présentent pas une fibrille unique comme unité structurale. Toutes les fibres d'amphibole sont droites et ne présentent pas la courbure typique du chrysotile.

Pour schématiser, les amphiboles présentent une structure moléculaire rigide de forme cylindrique, alors que la structure moléculaire du chrysotile ressemble davantage à une corde flexible faite de petites fibrilles qui peuvent se défaire en plus petites parties.

▪ Une structure moléculaire connue, mais une caractérisation du caractère asbestiforme difficile

Il est important de noter qu'à l'occasion par exemple de la caractérisation de chaussées routières et de la vérification de la présence ou de l'absence d'amiante volontairement ajouté (chrysotile), les analyses de laboratoires ont démontré que les granulats des enrobés routiers pouvaient contenir aussi de l'amiante naturellement présent.

Dans certaines carrières de régions amiantifères, le granulats peut contenir des matériaux fibreux de la famille des amiantes, en général de type trémolite-actinolite.

Or, il existe deux actinolites :

- L'actinolite amiante, dite asbestiforme, qui correspond à un faciès géologique particulier : on parle de faciès asbestiforme associé à une croissance cristalline naturelle unidirectionnelle qui confère à la fibre une souplesse et une résistance à la traction remarquables. Cette croissance ne peut avoir lieu que dans des contextes géologiques bien particuliers.
- L'actinolite non amiante, dont des fragments peuvent avoir une morphologie fibreuse (au sens de la norme NFX 43-050) sans pour autant être qualifiables d'asbestiformes. Les processus d'extraction et de transformation des granulats peuvent justement générer une grande quantité de ces fragments, appelés fragments de clivage.

A l'heure actuelle, l'application de la norme de caractérisation des fibres d'amiante (NFX 43-050 notamment) **ne permet pas de faire la différenciation entre les fibres d'amiante et les fragments de clivage issus du même minéral**. En effet, la désignation de fibre d'amiante, telle que définie dans la norme, répond à l'application des critères morphométriques et non pas à une identification du faciès du minéral.

QUELLES SONT LES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES DIFFERENTS TYPES D'AMIANTE ?

En règle générale, les amiantes sont reconnus pour leur qualités exceptionnelles de :

- Résistance à la chaleur et au feu,
- Faible réactivité chimique (acides et bases),
- Résistance mécanique élevée à la traction et aux frottements (grande flexibilité),
- Imputrescibilité (quasiment non biodégradable à l'échelle de la vie humaine),
- Isolant acoustique,
- Faible conductivité électrique (0,168 W/m/K)*,
- Capacité thermique massique** élevée (1045 J/kg/K),
- Faible densité (Masse volumique de l'amiante en fibres jointes = 1400 kg / m³).

*W = watt ; m = mètre ; K = kelvin ; J = joule ; kg = kilogramme

** Quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin (ou de 1°C) la température d'un kg d'amiante.

Ce sont essentiellement la longueur des fibres et leurs qualités (flexibilité / résistance) qui déterminaient les applications de l'amiante.

Les 3 variétés d'amiantes commerciales pouvaient se présenter aussi bien sous forme de fibres courtes que longues et donc être utilisées pour les mêmes applications.

A noter que le chrysotile a une charge de surface positive. Ceci a notamment conduit les industriels à mélanger le chrysotile avec jusqu'à 40 % d'amphiboles, qui possèdent une charge de surface négative, pour la fabrication de l'amiante-ciment (les amphiboles, après leur interdiction ont été remplacées par des agents tensio-actifs).

En conséquence, existe systématiquement plusieurs variétés d'amiante en mélange dans les déchets amiantés avec généralement une prédominance du chrysotile puisqu'il représentait avant les interdictions de commercialisation, plus de 90% de la production mondiale d'amiante ; amosite et crocidolite (variétés commerciales d'amiante amphibole) représentant le reste de la production.

Dans le cadre de l'étude, on parle d'amiante sans faire la plupart du temps de distinction entre amphiboles et chrysotile.

0. Introduction

RECORD a souhaité réaliser une **revue des gisements et des différents procédés de traitement en fin de vie des matériaux à base de fibres minérales naturelles (FMN), tout particulièrement d'amiante et de fibres minérales artificielles (FMA).**

Compte tenu des caractéristiques des activités des membres de RECORD, l'étude propose dans un premier temps d'analyser les **risques pour la santé** des matériaux fibreux dans le cadre de la phase de gestion de la fin de vie de ces matériaux.

Dans un deuxième temps, une analyse critique de procédures de **désamiantage et déconstruction d'ouvrages et d'équipements** est réalisée en s'appuyant sur quatre typologies de retours d'expérience :

- ✓ la déconstruction totale d'un site industriel : équipements thermiques et bâtiments,
- ✓ la déconstruction d'équipements : matériel ferroviaire roulant,
- ✓ la déconstruction d'un bâtiment tertiaire complexe : siège d'entreprise,
- ✓ la déconstruction d'un bâtiment tertiaire de bureaux usuel.

En effet, l'optimisation des coûts élevés de traitement des déchets amiantifères découle du travail effectué en amont sur les procédures de désamiantage et de déconstruction ; celles-ci sont établies en s'appuyant notamment sur un diagnostic amiante, un diagnostic préalable de démolition de qualité et mais également en capitalisant les connaissances des industriels sur leur patrimoine mobilier et immobilier.

Dans cette approche, l'étude relie volontairement la gestion des déchets amiantifères, malgré les spécificités réglementaires qui l'encadre, aux opérations de prévention et gestion des autres déchets liées aux projets de déconstruction d'ouvrages ou d'équipements. La pertinence d'une approche globale des deux problématiques n'étant plus à démontrer.

Ces deux étapes permettent la définition **des flux de matériaux fibreux en fin de vie à traiter** et conduisent au cœur de l'étude : la **revue critique prospective des technologies de traitement des déchets amiantifères et des autres matériaux FMA** qui comporte :

- ✓ Une présentation synthétique des différentes voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie,
- ✓ Une cartographie complète des procédés de traitement de matériaux fibreux contenant de l'amiante et des autres matériaux fibreux,
- ✓ L'identification des procédés existants et brevets en cours de développement,
- ✓ Une présentation détaillée et critique des technologies les plus prometteuses.

En outre, l'étude propose au fil de sa progression des **pistes de réflexion pour conduire des travaux de recherche et développement** tant sur la réalisation des opérations de désamiantage et déconstruction des ouvrages et équipements que sur les voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie.

1. Première partie

Synthèse des risques pour la santé humaine des déchets de matériaux contenant des fibres minérales naturelles ou artificielles

1.1. Objectifs et contenu de la synthèse des risques

Cette synthèse aborde les risques pour la santé humaine des déchets de matériaux contenant des fibres minérales, naturelles comme l'amiante ou artificielles telles les fibres de laines de verre, de roche, de laitier, les fibres céramiques réfractaires (FCR) et les fibres de verre à usage spécial.

Son objectif est de disposer de connaissances communes permettant de :

- Connaître les critères scientifiques de toxicité des matériaux à base de fibres minérales naturelles et artificielles (caractéristiques physiques et chimiques) permettant d'évaluer leur impact sur l'organisme,
- Expliquer les différences toxicologiques des divers types de fibres,
- Comprendre l'évaluation des risques sanitaires liés à l'exposition aux matériaux minéraux fibreux.

Cette synthèse explicite :

- La classification des fibres,
- Les bases de la caractérisation des risques sanitaires des fibres,
- La toxicité des fibres minérales naturelles (FMN) et des fibres minérales artificielles (FMA),
- L'évaluation et la limitation de l'exposition aux fibres minérales,
- La gestion des risques sanitaires des déchets de FMN et FMA,
- La gestion des risques sanitaires liés à une contamination des eaux par des fibres provenant de matériaux contenant de l'amiante.

1.2. Classification des fibres

Les fibres sont classées selon leur origine naturelle ou manufacturées, leur composition et leur structure. Cette étude concerne tout particulièrement les **fibres naturelles minérales cristallines** dont l'amiante et les **fibres artificielles minérales, siliceuses et vitreuses** dont l'usage le plus important est représenté par les laines minérales d'isolation.

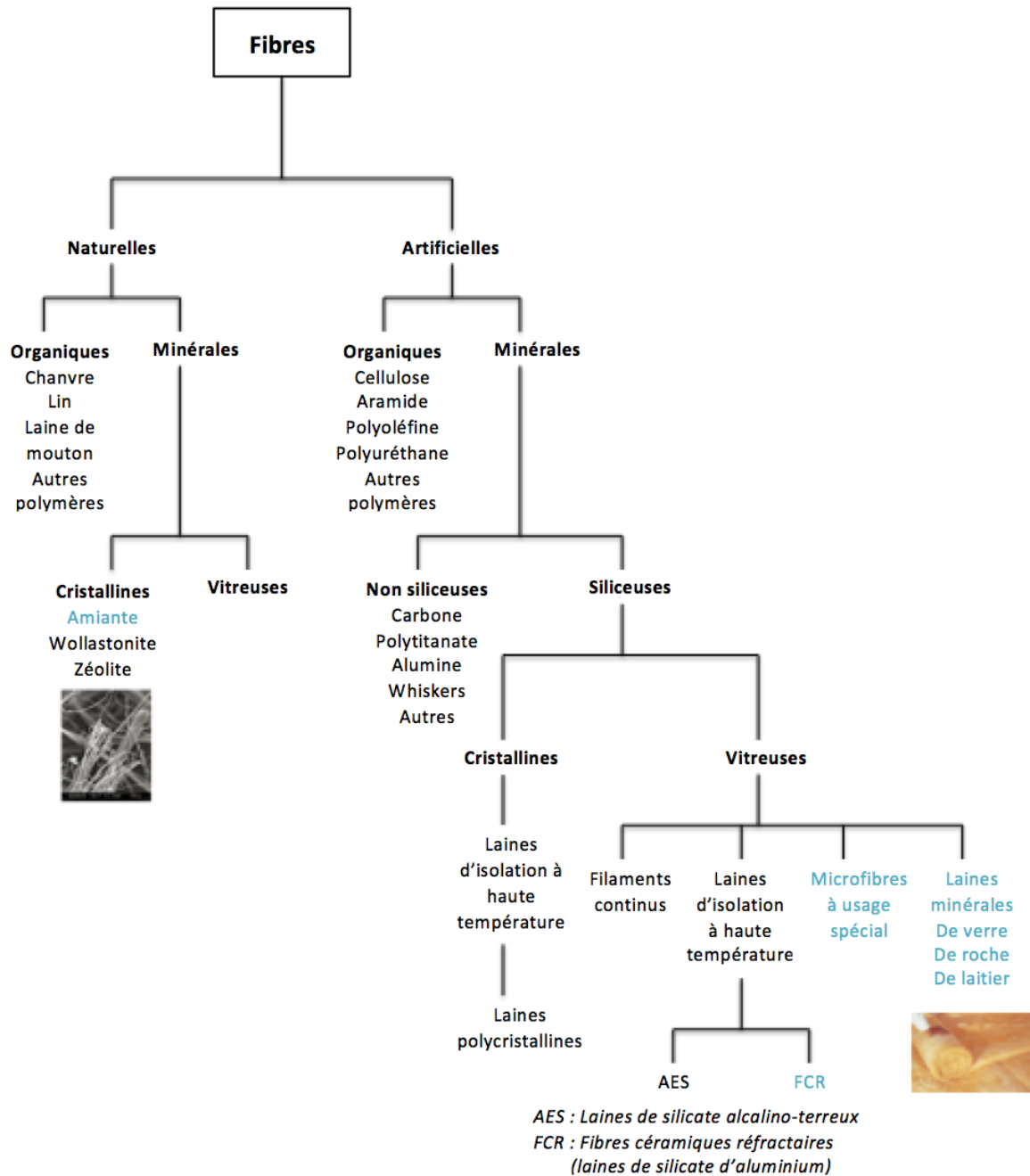


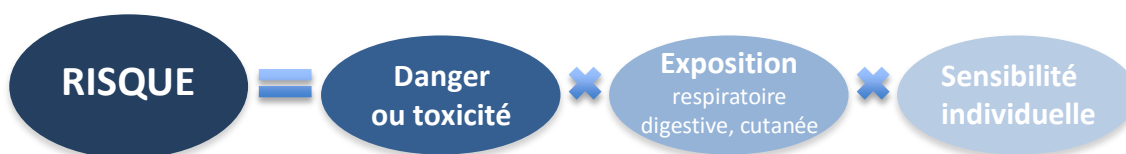
Figure 11 Présentation des différentes familles de fibres (complétée à partir de TIMA, 1991)

1.3. Bases pour la caractérisation des risques sanitaires des fibres

L'apport de deux disciplines scientifiques est indispensable pour apprécier les risques sanitaires liés à tout agent chimique, biologique et physique, dont les fibres :

- **la toxicologie** qui analyse la dangerosité ou toxicité d'un agent, définie par ses caractéristiques intrinsèques à causer un dommage physique ou psychique. La toxicité d'un agent est évaluée sur la base d'études *in vitro*, d'études animales et d'études épidémiologiques sur des populations humaines.
- **l'expologie** qui évalue l'exposition à un agent toxique, c'est-à-dire la possibilité d'être mis en contact avec ce danger par voie respiratoire, digestive ou cutanée.

Le risque sanitaire représente la probabilité de l'apparition d'une conséquence indésirable survenant à la suite de la rencontre entre l'homme et un danger. L'exposition à un agent toxique est indispensable pour que survienne le risque. Ce dernier dépend de la voie d'exposition (respiratoire, digestive, cutanée) et de la sensibilité individuelle qui est différente suivant l'âge (fœtus, enfant, personne âgée), les fragilités génétiques ou acquises (maladies).



La caractérisation du risque sanitaire (identification du danger et évaluation de l'exposition), est indispensable pour l'étape suivante qui est la prévention et la gestion du risque sanitaire.

Danger et risque sont donc deux notions distinctes et essentielles.

1.4. Toxicité des fibres minérales

1.4.1. Critères généraux de toxicité des fibres

1.4.1.1. La forme « fibre »

Un consensus établi par les hygiénistes appelle fibre une particule solide, naturelle ou artificielle, allongée dont le rapport entre la longueur et le diamètre est supérieur à trois. Les minéralogistes utilisent plus souvent un rapport de 5 voire de 10 pour définir une structure fibreuse. Les fibres prises en compte d'un point de vue réglementaire, dans les mesures d'air, sont celles définies par l'Organisation mondiale de la santé c'est-à-dire ayant une longueur supérieure à 5 µm et un diamètre inférieur à 3 µm en raison de leur pénétration au sein de l'appareil respiratoire.

La forme "fibre" est un élément pathogénique qui s'est révélé important avec l'amiante. En raison de cette structure, "toute nouvelle fibre proposée comme substitut à l'amiante ou pour tout autre usage doit être soupçonnée, *a priori*, d'être pathogène" (Rapport INSERM, 1999).

1.4.1.2. La taille des fibres

La taille des fibres conditionne leur capacité à être inhalées. Le danger est important pour des fibres de petit diamètre et de grande longueur. **Avec un diamètre inférieur à 3 µm, une fibre est dite « respirable », selon la terminologie anglaise. Elle peut se déposer dans le poumon profond (zone alvéolaire) avec le risque de migrer vers la plèvre.**

Si le diamètre est supérieur à 3 à 5 μm , la fibre est dite inhalable. Elle se dépose dans le tractus respiratoire, notamment au niveau des bronches et des bronchioles.

Des irritations passagères de la peau, des yeux et des voies respiratoires supérieures peuvent survenir avec les fibres de diamètre plus élevé.

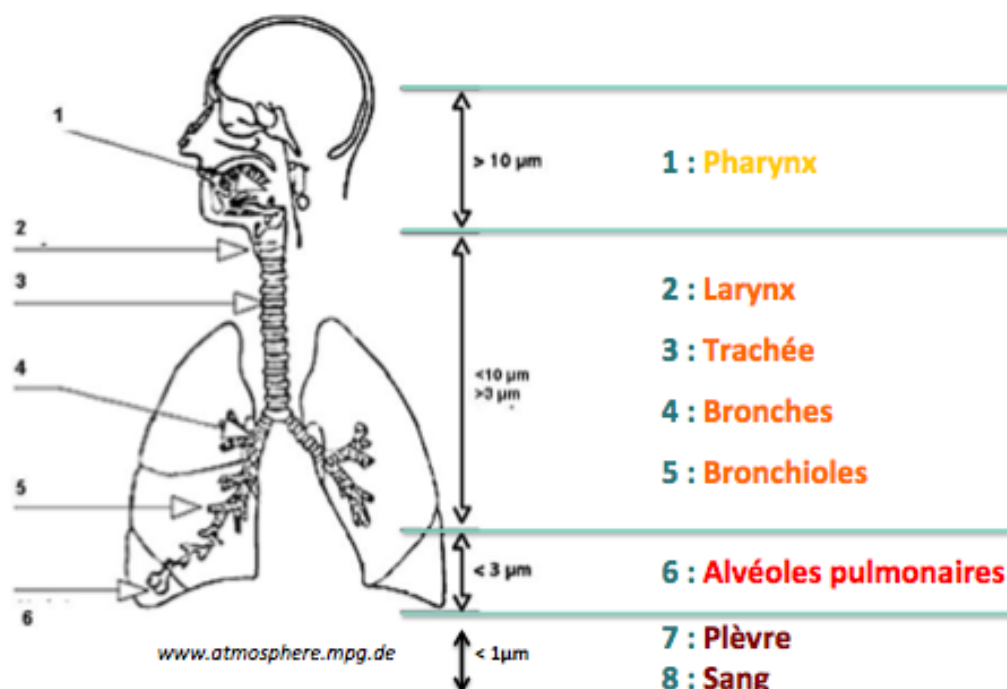


Figure 12 Pénétration dans le système respiratoire selon le diamètre des fibres

1.4.1.3. La structure des fibres

Le type d'organisation spatiale de la structure des fibres influe sur la toxicité. Une **structure moléculaire cristalline est un facteur de dangerosité** à la différence d'une **structure vitreuse considérée comme peu nocive** avec un pouvoir fibrosant limité et une relative solubilité en milieu pulmonaire.

1.4.1.4. La biopersistance des fibres

La **biopersistance pulmonaire est définie comme la durée de rétention des fibres dans le poumon**. Plus elle est longue, plus les risques de modification pathologique de l'épithélium respiratoire et de possibilité de migration dans la plèvre augmentent. Elle dépend des caractéristiques chimiques et physiques des fibres ainsi que des mécanismes d'élimination physiologique du poumon (dissolution, fragmentation, élimination mucociliaire trachéobronchique et action lymphocytaire).

En résumé, pour appréhender les facteurs de variation de la toxicité des fibres on retiendra que le potentiel toxique d'une fibre diminue lorsque :

- **sa longueur diminue,**
- **son diamètre augmente,**
- **sa biopersistance diminue,**
- **sa solubilité augmente.**

1.4.2. Toxicité des fibres minérales naturelles (FMN) - L'amiante

Le terme « amiante » recouvre une variété de silicates hydratés formés naturellement au cours du métamorphisme des roches.

Ce matériau naturel et fibreux est obtenu par broyage de deux familles minéralogiques :

- Les serpentines : chrysotile ou amiante blanc, majoritairement utilisé en France (95 %)
- Les amphiboles : crocidolite ou amiante bleu, amosite ou amiante brun, actinolite, anthophyllite, trémolite.

En France, avant le 1^{er} janvier 1997, date de l'interdiction de fabrication, de transformation, d'importation, de mise sur le marché et de vente de produits contenant de l'amiante, l'emploi du « *magic mineral* » a été très important dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans le monde du bâtiment, en raison de ses propriétés exceptionnelles :

- Résistance au feu,
- Capacité d'isolation,
- Inertie face aux agressions chimiques,
- Résistance mécanique élevée à la traction.

Un nombre important de produits anciens sont encore en place dans les bâtiments ou sur des installations industrielles. Les interventions sur ces produits, ou dans des environnements où ils sont présents, produisent des **déchets contenant de l'amiante**.

Les activités de traitement de ces déchets d'amiante peuvent donc être **source d'exposition aux fibres d'amiante**.

1.4.2.1. Facteurs de toxicité spécifique des fibres d'amiante

1.4.2.1.1. Structure cristalline et fragmentation longitudinale

La famille d'amiante le plus utilisé, la serpentine, représentée par le chrysotile, a une **structure moléculaire cristalline**. Cette organisation spatiale régulière est un des facteurs de leur dangerosité. En outre, **constituées de faisceaux de petites fibrilles**, accolées les unes aux autres, elles présentent la particularité de pouvoir se séparer très facilement dans le sens de la longueur sous l'effet d'usages, de chocs, de vibrations, de frottements (ou de simples courants d'air lorsqu'il s'agit d'un matériau friable).

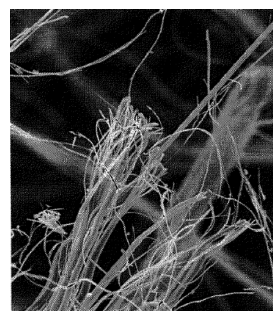


Figure 13 Fibres de chrysotile en microscopie électronique à balayage x 1000 (Photo CSTB)

Les fibres d'amiante sont 400 à 500 fois plus fines qu'un cheveu et sont le plus souvent invisibles. La fibre de chrysotile est d'un diamètre compris entre 0,1 à 1 μm et les dizaines voire centaines de fibrilles qui la constituent ont un **diamètre moyen excessivement petit, compris entre 0,02 et 0,03 μm** . Une fois inhalées, les fibres migrent vers les alvéoles pulmonaires et la plèvre.

De très nombreuses études ont confirmé le rôle majeur des paramètres dimensionnels dans les **effets cancérogènes des fibres d'amiante qui sont plus élevés avec l'augmentation de la longueur et la diminution du diamètre**.

Dans son rapport de février 2009, l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (AFSSET) a confirmé également le caractère cancérigène des fibres fines d'amiante (FFA) et n'a pas exclu le caractère toxique des fibres courtes (FCA) d'amiante de longueur inférieure à 5 µm. A la différence des fibres dites « OMS », ces deux derniers types de fibres ne sont pas visibles en microscopie optique utilisée jusqu'à maintenant.

Dénomination des fibres d'amiante	Longueur	Diamètre	Rapport longueur/diamètre	Types d'environnements où se trouvent l'ensemble de ces fibres
Fibres longues d'amiante FLA dites « fibres OMS »	≥ 5 µm	0,2 µm < d < 3 µm	> 3	<ul style="list-style-type: none"> • environnement général extérieur : « bruit de fond » • environnement général intérieur tout bâtiment public ou privé avec prépondérance des FCA selon l'état de vétusté des matériaux • environnement professionnel travaux de désamiantage selon : <ul style="list-style-type: none"> - nature des matériaux - état de dégradation - modes opératoires d'intervention (destructif/non destructif)
Fibres courtes d'amiante FCA	< 5 µm	d < 3 µm	≥ 3	
Fibres fines et longues d'amiante FFA	≥ 5 µm	Entre 0,01 0,2 µm	≥ 3	

Figure 14 Tableau de dénomination des fibres d'amiante selon les critères dimensionnels

1.4.2.1.2. Biopersistance

La biopersistance pulmonaire augmente rapidement avec la longueur des fibres d'amiante. Les fibres retenues dans les tissus demeurent intactes. Certaines sont enrobées avec une protéine contenant du fer pour former des corps d'amiante.

L'INSERM (1996) mentionne que « la biopersistance des fibres de chrysotile est inférieure à celle des amphiboles ». Pour des fibres de longueur supérieure à 20 µm, la biopersistance du chrysotile < amosite < crocidolite < trémolite.

Même si de nombreuses études ont suggéré que le pouvoir cancérigène du crocidolite était supérieur à celui du chrysotile, le Centre international de recherche sur le cancer a classé, en 1987, les six variétés d'amiante (actinolite, amosite, anthophyllite, chrysotile, crocidolite, trémolite) dans le groupe 1 des cancérigènes certains pour l'homme.

La rétention à long terme des fibres d'amiante dans le poumon et la longue période de latence pour l'apparition des maladies respiratoires reliées à l'amiante, suggère que les individus exposés tôt dans la vie ont un risque plus élevé de développer des problèmes respiratoires que ceux qui ont été exposés plus tard.

1.4.2.1.3. Autres facteurs

D'autres paramètres interviennent dans la toxicité des fibres d'amiante : leur réactivité de surface, leur composition chimique ou leur interaction avec certaines molécules comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Le contenu en fer dans les poumons est un autre facteur de toxicité de l'amiante. La première source de fer est la fibre elle-même : la crocidolite et l'amosite peuvent contenir différentes impuretés comme du fer, de l'aluminium du fer entre 26 et 36 % de leur poids. La deuxième provient des minéraux présents avec l'amiante (pyrite, magnétite, etc.) et le minerai de fer qui peuvent se déposer dans les

poumons avec la fibre d'amiante. Le fer est aussi un composant de la couche de protéines des corps d'amiante.

1.4.2.2. Effets sanitaires des fibres d'amiante

1.4.2.2.1. Fibrose pulmonaire et pleurale

L'inhalation des fibres d'amiante peut conduire à l'asbestose, pneumopathie infiltrante fibrosante diffuse, d'évolution lente qui se traduit par une gêne respiratoire. La plèvre peut aussi subir un épaississement fibreux, parfois calcifié, sous forme de plaques pleurales qui sont un indice d'exposition à l'amiante dans 80 à 90 % des cas, surtout si elles sont bilatérales. Elles sont le plus souvent asymptomatiques et sont liées au degré d'exposition et au temps de latence qui est généralement long (plus de 15 ans après la première exposition à l'amiante). Leur évolution vers un cancer du poumon ou un mésothéliome n'est pas systématique.

1.4.2.2.2. Cancer de divers organes : poumon, plèvre, péritoine, larynx et ovaires

Toutes les fibres d'amiante sont cancérogènes quelle que soit leur type minéralogique. Elles sont responsables de cancers bronchopulmonaires et de mésothéliomes de la plèvre ou du péritoine. Le mésothéliome, considéré comme une maladie spécifique de l'amiante, survient plusieurs décennies (30 à 50 ans) après l'exposition. Son pronostic moyen actuel est le décès dans les deux ans suivant le diagnostic.

Après avoir classé, en 1977, l'amiante comme cancérogène certain, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) a reconnu, en 2009, deux nouveaux cancers induits par une exposition aux fibres d'amiante: celui du larynx et des ovaires. En revanche, il a estimé que les preuves étaient actuellement limitées pour le cancer colorectal, les cancers du pharynx et de l'estomac.

En France, 10 à 20 % des cancers du poumon et 85 % des mésothéliomes seraient dûs à l'amiante, selon l'Agence nationale de sécurité sanitaire (ANSES).



DANGER

H350 – Peut provoquer le cancer

H372 – Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée par inhalation

Figure 15 Pictogramme Danger Amiante

N°CAS	Amiante et ses différentes formes	Groupe	Volume	Année
001332-21-4	Fibre d'amiante non spécifiée	1 Cancérogène certain pour l'homme	Monographie14 Supplément 7 Volume 100C	1977 1987 2009
13768-00-8	Actinolite			
12172-73-5	Amosite			
17068-78-9	Anthophyllite			
12001-29-5	Chrysotile			
12001-28-4	Crocidolite			
14567-73-8	Trémolite <i>NB. Les substances minérales qui contiennent de l'amiante, comme le talc ou la vermiculite, doivent être aussi considérées comme cancérogènes pour l'homme</i>			

Figure 16 Tableau de classification des différentes formes d'amiante par le Centre international de recherche sur le cancer

1.4.3. Toxicité des fibres minérales artificielles (FMA)

Parmi les fibres minérales artificielles, on distingue, selon l'importance de leur utilisation :

- les **fibres de verre, de roche et de laitier**, respectivement manufacturée à partir de verre fondu, de roches ignées fondues, de laitier de haut fourneau fondu. Elles sont très largement employées en isolation thermique, acoustique ou pour la protection contre le feu,
- les **fibres céramiques réfractaires (FCR)**, dont la résistance aux températures élevées (jusqu'à 1 450 °C pour les fibres contenant de l'oxyde de zirconium) en fait un matériau de choix pour l'isolation thermique haute température (fours industriels, hauts-fourneaux, industrie ferroviaire, etc.). Elles ne représentent que 2 % de la production des FMA.
- les **fibres de verre à usage spécial** utilisées comme matériau d'isolation phonique et thermique dans l'industrie aérospatiale et aéronautique et comme média filtrant dans les systèmes de filtration de liquide ou d'air principalement de type 475 à haute efficacité pour la ventilation générale des bâtiments et à très haute efficacité pour les hôpitaux, la microélectronique, les installations nucléaires. La fibre de verre à usage spécial de type E n'est plus importée, ni commercialisée sur le territoire européen depuis 2001 à l'exception de quelques applications.

1.4.3.1. Facteurs de toxicité spécifique des FMA

1.4.3.1.1. Structure vitreuse et composition chimique

À la différence de l'amiante, les fibres minérales artificielles n'ont pas une structure cristalline, mais vitreuse ou amorphe, caractéristique beaucoup moins pathogène. De plus, le mode de fragmentation diffère aussi de celui de l'amiante. Les fibres artificielles se cassent de manière transversale en segments de plus en plus courts, sans création de fibrilles de diamètre plus petit.

Dans les années 1990, la composition chimique des fibres de laines de verre et de roche a évolué pour augmenter leur solubilité dans le tissu pulmonaire et ainsi diminuer leur biopersistance. La teneur en alumine (Al_2O_3) a été diminuée dans les fibres de laine de verre tandis qu'elle a été augmentée dans les fibres de laine de roche dans lesquelles le pourcentage de silice (SiO_2) a été abaissé.

Composition chimique (% en poids)		Fibres constituant les laines minérales		
		verre	roche	laitier
Silice vitreuse	(exprimé en SiO_2)	63 à 67	33 à 43	37 à 42
Alumine	(exprimé en Al_2O_3)	1 à 4	16 à 24	17 à 20
Oxydes de fer	(exprimé en Fe_2O_3)	0 à 1	3 à 9	1 à 2
Oxyde de calcium	(exprimé en CaO)	9 à 12	23 à 33	37 à 39
Oxyde de magnésium	(exprimé en MgO)			
Oxyde de sodium	(exprimé en Na_2O)	15 à 19	1 à 10	0 à 2
Oxyde de potassium	(exprimé en K_2O)			
Oxyde de bore	(exprimé en B_2O_3)	2 à 6	0	0

Figure 17 Tableau de composition chimique actuelle des fibres constituant les laines minérales (Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014)

Les fibres céramiques réfractaires (FCR) sont fabriquées à partir de mélanges de silice (47 à 54 %) et d'alumine (35 à 51 %). D'autres oxydes, de zirconium, de bore ou de titane peuvent être ajoutés en fonction des propriétés recherchées, mais leur teneur totale reste inférieure à 18 %.

Composition	Type de verre						
	E [1]	475		253		753 [1]	481
		Johns Manville 475 [2]	Évanite B Lauscha 475 [2]	Johns Manville 253	Évanite M [2]		Johns Manville
SiO ₂	54-55	57-58	56,4-60,4	65,5	65,8-71,2	62-65	60,8
Al ₂ O ₃	14-15	5-6	5,2-6,4	3	3,3-4,4	3-5	2
B ₂ O ₃	7-8	10-11	10-12	6,3	4,2-5,3	5-6	11,4
K ₂ O	0-0,2	2-3	2,6-3,4	0,6	1,6-2	0-1	4,2
Na ₂ O	0-0,6	10-11	9-11	16,3	10,9-12,9	14-16	9,1
MgO	0,3-3	0-0,5	0,15-0,5	2,8	2,3-3,3	2-3	1,3
CaO	18-21	2-3	1,5-2,3	5,8	4,8-6,6	5-6	1,9
BaO		5	4,5-5,5		0-0,2	0-0,2	5,0
TiO ₂	0,5-0,6	0-0,1				0-0,1	
Fe ₂ O ₃	0,2-0,4	0-0,1				0-0,1	
F ₂	0-1		0,3-0,7	1	0,5-1	0-1	
ZnO		4	3,5-4,5		0-0,4		4,2

Figure 18 Tableau de teneurs en éléments chimiques exprimées en pourcentages massiques pour différentes fibres de verre à usage spécial
(Source : INRS, Fibres de verre à usage spécial, 2007)

1.4.3.1.2. Caractéristiques dimensionnelles

Le diamètre moyen des fibres des laines minérales est plus élevé que celui des fibres d'amiante :

- laine de verre, de roche et la laine de laitier : de 3 à 5 micromètres (µm)
- fibres céramiques réfractaires (FCR) : de 1 à 3 µm
- fibres de verre à usage spécial : de 0,26 µm à 3 µm pour le type 475, verre le plus utilisé.

Le potentiel de pénétration dans le poumon est moins élevé pour les fibres de laine de verre, de roche et de laitier que pour l'amiante et dans une moindre mesure que pour les FCR et les fibres de verre à usage spécial.

1.4.3.1.3. Biopersistance

• Fibres de verre, de roche et de laitier

Au début des années 1990, la modification des teneurs en alumine et en silice de ces fibres minérales manufacturées a accru leur solubilité dans les tissus biologiques que leur structure amorphe facilite également. Pour satisfaire aux critères d'exonération de classement cancérigène de la directive européenne 97/69/CE, la durée de demi-vie pulmonaire de ces fibres est actuellement inférieure à 10 jours lors des essais de biopersistance par inhalation chez le rat.

Types de fibres	K _{DIS} ng.cm ⁻² .h ⁻¹	
	pH = 4,5	pH = 7,4
Crocidolite	0,1 – 0,5	0,3
Fibres de roche	65	23
Fibres de laitier	400 – 500	119
Fibres de verre	8	142

Plus la valeur du (K_{dis}) est élevée, plus les fibres sont solubles

Figure 19 Tableau de coefficient de dissolution (K_{dis}) de plusieurs fibres dans les cellules (pH 4,5) et dans le milieu extracellulaire (pH 7,4)
(Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014)

- **Fibres céramiques réfractaires**

De toutes les FMA, les FCR sont parmi les moins solubles dans les milieux biologiques et sont biopersistantes. Selon l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), dans la publication parue en 2011 « *Fibres céramiques réfractaires – Isolation et protection thermique en milieu industriel* », la demi-vie des FCR, dans le poumon du rat, est estimée entre 45 et 55 jours lors des essais par inhalation.

- **Fibres de verre à usage spécial**

Selon l'étude de Hesterberg mentionnée dans le document de l'INRS publié en 2007 « *Fibres de verre à usage spécial* », la demi-vie pondérée des fibres de verre à usage spécial de type E est de 79 jours et de 49 jours pour les fibres 475. Les fibres à usage spécial qui ont un diamètre inférieur à 3,5 µm et une longueur supérieure à 200 - 250 µm sont respirables et peuvent se déposer dans les poumons. Ces fibres perdurent dans le poumon selon leur composition chimique et leur dimension, les fibres longues (> 20 µm) ne peuvent être phagocytées par les macrophages pulmonaires.

	Amiante	Laines minérales de verre, de roche et de laitier
Structure	Cristalline	Vitreuse ou amorphe
Diamètre	<1,5 µm	3 à 5 µm
Longueur	40 µm	10 µm à plusieurs cm
Cassure	Longitudinale - Diminution de diamètre nanofibrilles 0,02 µm (<i>nanoparticules</i> < 0,1 µm)	Transversale - Diminution de longueur
Biopersistance (Durée de demi-vie)	Crocidolite - Rat : 500 jours - Primates : 1 530 jours Chrysotile : pas quantifiable car fragmentation	Rat - Rat < 10 jours

Figure 20 Synthèse des caractéristiques physiques et chimiques des FMN et FMA (Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014)

1.4.3.2. Effets sanitaires des FMA

1.4.3.2.1. Pas de risque accru de cancer pour les fibres de laines de verre, de roche et de laitier non biopersistantes

Les études animales par inhalation n'ont pas montré de lien entre l'exposition respiratoire de fibres de laines minérales et les pathologies telles que la fibrose pulmonaire, le cancer du poumon, le mésothéliome. Sur la base des études de toxicologie, de biopersistance et de grandes études épidémiologiques, aux États-Unis et en Europe, concernant le risque potentiel de cancers respiratoires et d'autres cancers associés à l'exposition professionnelle à la laine de verre, à la laine de roche/de laitier lors de leur fabrication, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC/IARC, 2002) qui dépend de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) a reclassé ces fibres de la catégorie 2B « peut être cancérigène pour l'homme » à la catégorie 3 « ne peut être classé quant à sa cancérogénicité pour l'homme ».

Le CIRC mentionne que « *les études épidémiologiques publiées depuis la dernière évaluation de ces fibres en 1988 par les monographies du CIRC ne montrent pas de risques accrus de cancer du poumon* ou de mésothéliome liés à une exposition professionnelle au cours de la fabrication de ces matériaux, et montrent des indications insuffisantes globalement pour tout risque de cancer* ».

Concernant le classement européen, les fibres non biopersistantes constituant les laines minérales sont exonérées du classement cancérigène.

Ces fibres ne sont plus classées irritantes pour la peau depuis janvier 2009. En effet, elles ne déclenchent pas de réaction cutanée inflammatoire ou allergique. Seule une irritation mécanique (comme lors d'une abrasion par du verre) peut survenir avec les fibres de diamètre supérieur à 5 µm au niveau de la peau, des yeux et des voies respiratoires supérieures.

1.4.3.2.2. Les FCR, potentiel cancérigène supposé

Les FCR ont fait l'objet d'une évaluation toxicologique dans le cadre des expertises collectives conduites par l'INSERM en 1999 et par le CIRC en 2002 dont les principales conclusions concernent :

- Les dermatites irritatives uniquement mécaniques et non inflammatoires et allergiques. Pour cette raison l'Union européenne a supprimé le classement « irritant pour la peau » des FCR.
- Les pathologies respiratoires non malignes :
 - Plaques pleurales et d'altérations de la fonction respiratoire chez les ouvriers fumeurs des usines de production de FCR aux Etats-Unis,
 - Potentiel fibrosant en expérimentation animale.
- Les cancers :
 - Mésotéliomes, cancers broncho-pulmonaires en expérimentation animale (cancérogénicité comparable à l'amiante chez l'animal),
 - Chez l'homme, les études épidémiologiques publiées à ce jour n'ont pas mis en évidence d'excès de risques de cancer.

Les FCR sont classées :

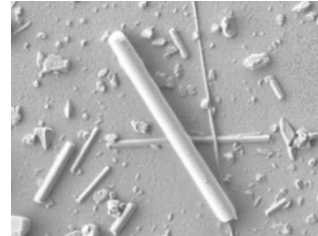
- par le CIRC, dans le groupe 2B (agent pouvant être cancérigène pour l'homme).
- par l'UE, dans la catégorie 1B (substance dont le potentiel cancérigène pour l'être humain est supposé ; la classification dans cette catégorie s'appuyant largement sur des données animales).

En outre, comme tout matériau réfractaire siliceux porté à plus de 1 000°C, les fibres céramiques réfractaires peuvent former de la cristobalite (la silice cristalline inhalée sous forme de quartz ou de cristobalite de source professionnelle est classée cancérigène de groupe 1 par le CIRC, agent cancérigène pour l'homme et fait l'objet du tableau de maladies professionnelles n° 25).

Les teneurs en silice cristalline formée lors de leur utilisation dépendent des conditions de fonctionnement des installations (fours industriels, hauts-fourneaux, etc).

1.4.3.2.3. Les fibres de verre de type E et 475, potentiel cancérigène supposé

Les éléments de toxicologie disponibles sur les fibres de verre à usage spécial concernent principalement les types E et 475, en sachant que le type E n'est plus importé, ni commercialisé sur le territoire européen depuis 2001 :



Fibres céramiques réfractaires en microscopie électronique à balayage x 1000.
(Photo INRS)

Cancérigène catégorie 1B



DANGER

H350i Peut provoquer le cancer par inhalation.

Selon règlement CE n° 1272/2008 intégrant les critères de CLP
Figure 21 Photo microscopique de la fibre céramique et pictogramme de danger

- Pas d'irritations cutanées ou oculaires pour les fibres de diamètre inférieur à 4,5 µm comme c'est le cas pour le verre E et 475.
- Les pathologies respiratoires non malignes : potentiel fibrosant en expérimentation animale pour les fibres de verre de type E.
- Les cancers :
 - Effet cancérigène par inhalation des fibres de type E et 475 en expérimentation animale.
 - Chez l'homme, les données sont limitées et n'apportent pas d'informations suffisantes pour conclure, notamment sur de possibles effets cancérigènes.
- La classification de la cancérogénèse :
 - Les fibres de verre de type E et 475 sont classées par le CIRC, dans le groupe 2B (agent pouvant être cancérogène pour l'homme).
 - par l'UE, l'Agence européenne des produits chimiques (Echa) a soumis à consultation publique, jusqu'au 22 avril 2014, la proposition française formulée par l'ANSES de révision de classification et de l'étiquetage des fibres de verre de type E dans la catégorie 1B (potentiel cancérogène supposé) et des fibres de verre de composition représentative dite « à usage spécial » en catégorie 2, (suspectées d'être cancérogènes pour l'homme).

Agence	Laine de verre	Laine de roche	Laine de laitier	Fibre de verre à usage spécial de type E et 475	FCR
CIRC (1988)	Groupe 2B «Agent peut-être cancérogène pour l'homme»				
CIRC (2001)	Groupe 3 «Agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme»			Groupe 2B « Agent peut-être cancérogène pour l'homme»	
EPA (IRIS 1997)	Pas de classification				Groupe B2 « cancérogène probable pour l'homme »
NTP (1994)	Peut raisonnablement être anticipé comme cancérogène	Pas de classification			Peut raisonnablement être anticipé comme cancérogène
ACGIH (1997)	Groupe A3 « cancérogène animal »				Groupe A2 « cancérogène suspecté chez l'homme »
Commission européenne (1997)	Cancérogène de catégorie 3 sauf exonération				Cancérogène de catégorie 2

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer de l'OMS

EPA : US Environmental protection agency

NTP : US National toxicology program

ACGIH : American Conference of Industrial Hygienists

Figure 22 Fibres céramiques réfractaires en microscopie électronique à balayage x 1000
(Source : ANSES. Rapport relatif aux FCR et fibres de verre à usage spécial 2007)

1.5. Évaluation et limitation de l'exposition aux fibres minérales

La prévention des maladies qu'elle soit d'origine professionnelle ou résidentielle demande que l'exposition des personnes aux polluants présents dans l'air des lieux de travail et des bâtiments soit évitée ou réduite aux niveaux les plus faibles possible. Pour les différents agents, y compris les cancérigènes, le ministère chargé du Travail a publié des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) qui peuvent être soit des valeurs limites admises et indicatives (VL), soit des valeurs réglementaires indicatives (VRI) ou réglementaires contraignantes (VRC).

1.5.1. Fibres minérales naturelles. Amiante

1.5.1.1.1. Valeurs limites d'exposition

Depuis le 1^{er} juillet 2012, la concentration moyenne en fibres d'amiante dans l'air ne doit pas dépasser 100 fibres par litre sur 8 heures de travail. **Après le 1^{er} juillet 2015**, cette concentration ne devra pas dépasser **10 fibres par litre sur 8 heures de travail**.

La technique utilisée pour le comptage des fibres retenues dites OMS (longueur > 5 µm, rapport longueur/diamètre > 3, largeur ≤ 3 µm) est maintenant la microscopie électronique en transmission analytique (META) et plus la microscopie optique.

1.5.1.1.2. Niveaux d'exposition

Le niveau d'exposition à l'amiante varie selon le taux d'empoussièrement. Le décret n° 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante a défini trois niveaux d'empoussièrement :

- **Premier niveau** : empoussièrement dont la valeur est inférieure à la valeur limite d'exposition professionnelle, actuellement 100 fibres /litre d'air respiré, après le 1^{er} juillet 2015, **10 fibres /litre**,
- **Deuxième niveau** : empoussièrement dont la valeur est supérieure ou égale à la valeur limite d'exposition professionnelle et inférieure à 60 fois la valeur limite d'exposition professionnelle (**après le 1^{er} juillet 2015 : entre 10 et 600 fibres /litre**),
- **Troisième niveau** : empoussièrement dont la valeur est supérieure ou égale à 60 fois la valeur limite d'exposition professionnelle et inférieure à 250 fois la valeur limite d'exposition professionnelle (**après le 1^{er} juillet 2015 : entre 600 et 2 500 fibres /litre**).

Un niveau supérieur à 2 500 fibres/litre sera interdit au regard des moyens de protection à disposition.

Opérations sur produit amianté	Nombre de fibre/litre d'air respiré
Découpe d'une plaque de fibro-ciment	20 000
Manutention d'une plaque de fibro-ciment	1 120
Utilisation d'un karcher sur une toiture extérieur	250

Figure 23 Exemples de niveaux d'exposition à l'amiante (Source : CARSAT)

Une campagne de mesures d'exposition professionnelle aux fibres d'amiante a été réalisée par l'INRS de novembre 2009 à octobre 2010 sur des chantiers en situation réelle de travail. Les prélèvements ont été analysés en microscopie électronique à transmission analytique (META) au lieu de la classique microscopie optique à contraste de phase (MOCP).

Cette étude a permis de connaître les niveaux d'empoussièrement générés selon le type de matériau amianté et la technique de traitement (retrait, confinement ou maintenance), mais aussi la répartition granulométrique des différentes classes de fibres sur les filtres de prélèvement. Outre les fibres

« OMS » qui correspondent aux fibres actuellement comptées en milieu de travail, les fibres non visibles en MOCP ont été quantifiées : les fibres fines (FFA) et les fibres courtes (FCA).

Les empoussièrtements les plus élevés en fibres (OMS + FFA) correspondent aux retraits des plâtres amiantés, des flocages, des peintures et enduits (Tableau 9). Il est à noter que les flocages mesurés n'étaient constitués que d'amphiboles. Des flocages de chrysotile auraient *a priori*, généré des quantités plus importantes de FFA, proches des valeurs observés pour les plâtres amiantés, du fait de leur capacité à générer des fibrilles plus fines que les amphiboles.

Matériaux	concentrations moyennes fibres par litre	concentration maximale fibres par litre
Plâtres amiantés	> 11 000	60 000
Flocages (amphiboles)	> 6 000	29 000
Peintures et enduits	> 3 000	6 300
Matériaux dans bâtiments sinistrés	> 2 600	21 000

Figure 24 Empoussièrtement en fibres lors du retrait de matériaux

(Source : INRS, Synthèse des résultats, 2011)

Les résultats de la répartition de chaque catégorie et nature de fibres, toutes situations confondues, sont présentés dans le tableau suivant. Ils soulignent la présence importante des FCA (68 %) et des concentrations sensiblement identiques pour les fibres OMS et FFA, respectivement de 15 % et 17 %.

		Min (f/l)	Moyenne arithmétique (f/l)	Médiane (f/l)	Max (f/l)
OMS (15%)	serpentes	1,48	539	18	16 300
	amphiboles	1,47	337	5	23 025
	Amiante ⁴	1,48	866	38	23 025
FFA (17%)	serpentes	1,48	1 742	21	51 450
	amphiboles	1,47	91	5	6 358
	Amiante	1,48	1 822	24	51 450
FCA (68%)	serpentes	1,48	13 602	190	256 072
	amphiboles	1,47	1 220	5	89 655
	Amiante	1,48	14 811	356	256 072

Figure 25 Répartition des différentes fibres d'amiante lors d'opérations sur matériaux amiantés

(Source : INRS, Synthèse des résultats, 2011)

1.5.2. Fibres minérales artificielles : laines de verre, de roche, de laitier

1.5.2.1.1. Valeurs limites d'exposition

En hygiène industrielle et en France, la **valeur limite moyenne d'exposition (VME)** a été fixée pour les laines minérales à **1 fibre/ml** (cm³) pour 8 heures d'exposition/jour, 5 jours/semaine.

1.5.2.1.2. Niveaux d'exposition

Le Syndicat national des fabricants de laines minérales manufacturées (FILMM) communique dans son Livre blanc (édition 2014) des niveaux d'exposition selon le cycle de vie de ses isolants.

Stade du « cycle de vie »	Fibre/ml	
	Moyenne	Mini - Maxi
Lors de la production	0,2	0,02 - 1,0
Lors de la pose	0,1	0,03 - 0,25
<i>Panneaux, rouleaux</i>	0,2	0,09 - 0,27
<i>Vrac (laine à souffler)</i>	0,2	0,05 - 0,39
<i>Projection</i>		
Lors de l'utilisation	< 0,01	
Lors du démontage	0,3	0,05 - 0,8

Figure 26 Niveaux d'exposition aux fibres lors des divers stades du cycle de vie des produits en laine minérale manufacturée (Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014)

Pour la collecte des déchets de laines minérales, le FILMM ne fait pas de recommandations particulières de protection des ouvriers, qui font de la démolition puisqu'ils ont déjà des équipements de protection individuelle en raison des poussières produites (masque, lunettes, habits avec manches longues). Le FILMM n'a pas mené pour le moment des études sur l'exposition aux fibres dans des chantiers de démolition /déconstruction sélective.

L'INRS dans la fiche pratique de sécurité éditée en 2013 sur les bonnes pratiques d'utilisation des laines minérales d'isolation souligne que certaines opérations sont suspectées de produire des concentrations en fibres en suspension supérieures à 1 fibre/litre ou par cm³ notamment les opérations de retrait, de démolition et d'intervention sur les laines minérales en place. En effet, le vieillissement entraîne la décomposition des agents inhibiteurs de poussières et des liants ce qui accroît l'empoussièrément.

1.5.3. Fibres minérales artificielles : Fibres céramiques réfractaires

1.5.3.1.1. Valeurs limites d'exposition

En hygiène industrielle et en France, la **valeur limite moyenne d'exposition (VME) réglementaire contraignante pondérée sur 8 heures est de 0,1 fibre/ml (cm³)**.

1.5.3.1.2. Niveaux d'exposition

Les travailleurs exposés aux FCR ont été répertoriés par trois enquêtes : la base de données Carex (1993) concernant 15 000 à 20 000 salariés, l'enquête SUMER (2003) auprès de 104 000 salariés, une étude de filière INRS (2006) sur 10 000 salariés.

Les situations de travail les plus exposées aux FCR sont :

- Les activités de finition et de transformation de FCR (transformation de produits primaires : vrac et nappes, 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 ce même sur des prélèvements de longues durées.
- Les activités de retrait de FCR usagées (arrachage, grattage...), dans les grands fours industriels par exemple, entraînant des niveaux supérieurs à 10 ou 20 f/ml avec des durées d'interventions relativement longues.

Exposition moyenne par catégorie de travaux <i>(résultats CRAM/CARSAT-INRS 1996-2001)</i>		
Travaux	Concentration atmosphérique moyenne (fibre/cm³)	Résultats supérieurs à 0,1 fibre/cm³ (VME)
Fabrication	0,4	99,1 %
Manipulation en vrac	0,3	92,6 %
Assemblage	0,3	77,9 %
Pose	0,5	93,8 %
Dépose	1,3	91,5 %
Découpe	1,5	99,3 %

Figure 27 Niveaux d'exposition aux fibres céramiques réfractaires

1.5.4. Fibres minérales artificielles : Fibres de verre à usage spécial

1.5.4.1.1. Valeurs limites d'exposition

Pour les fibres de verre à usage spécial, la valeur limite française de moyenne d'exposition (VME) indicative est de 1 fibre/cm³.

1.5.4.1.2. Niveaux d'exposition

En France, en l'absence d'industrie de production de fibres de verre à usage spécial, l'exposition professionnelle des ouvriers concerne uniquement leur intégration dans des applications pour l'isolation des aéronefs et la fabrication de médias filtrants, de filtres et de séparateurs de batterie.

Il n'existe aucun étiquetage spécifique des articles qui contiennent ce type de fibres. Les précautions de manipulation par les professionnels en charge de la maintenance et du traitement des déchets résultent avant tout des conditions d'usage plus que du danger potentiel représenté par ces fibres elles-mêmes. A titre d'exemple, les filtres à très haute efficacité utilisés dans les laboratoires et destinés à retenir des virus hautement pathogènes nécessitent un traitement spécifique d'élimination, du fait du risque biologique.

Les producteurs de fibres de verre à usage spécial déclarent que la personne manipulant le filtre lors de l'installation, la maintenance ou le retrait n'est pas en contact avec l'élément filtrant placé dans un boîtier et maintenu par des liants. Ils assurent que ces fibres sont en principe inaccessibles pour la population générale en conditions normales d'utilisation des articles qui en contiennent. Toutefois concernant les filtres utilisés pour la filtration d'air, il existe très peu de données sur leur potentiel à émettre des fibres dans le circuit de ventilation des bâtiments tertiaires et résidentiels.

A l'heure actuelle, aucune alternative ne semble égaler les performances des fibres de verre à usage spécial dans le domaine de la filtration de l'air à très haute efficacité et comme séparateurs d'un type de pile au lithium et de certaines batteries au plomb. En revanche, pour la filtration à haute efficacité, les filtres à base de fibres polymères représentent actuellement 50 % du marché mais nécessitent une maintenance plus régulière.

Selon les producteurs, lors de la fabrication des fibres, les concentrations moyennes d'exposition à ces fibres de type 475 sont de l'ordre de 0,6 fibres/cm³ se situant ainsi au dessous de la limite d'exposition admise de 1 fibre/ cm³.

Il existe un manque réel de données relatives aux fibres de verre à usage spécial, voire parfois une certaine opacité.

1.6. Gestion des risques sanitaires des déchets de FMN et FMA

1.6.1. Aspects réglementaires

1.6.1.1. Déchets dangereux / déchets non dangereux

La justification du **classement en déchet dangereux ou non dangereux des déchets de FMN et FMA** est explicitée dans le Code de l'Environnement.

Article L541-1-1 du Code de l'Environnement	« Au sens du présent chapitre, on entend par : Déchet : toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ; »
Article R541-8 du Code de l'Environnement	« Déchet dangereux : tout déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées à l'annexe I au présent article. Ils sont signalés par un astérisque dans la liste des déchets de l'annexe II au présent article. »

La référence à l'Annexe I de l'Article R541-8 du Code de l'Environnement relative aux propriétés qui rendent les déchets dangereux doit être comprise comme une référence au Règlement (UE) n°1357/2014 de la Commission Européenne du 18 décembre 2014 (remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives). En effet, ce **règlement est obligatoire dans tous ses éléments et directement applicable dans tout État membre à compter du 1er juin 2015** (même si à l'heure de la rédaction du présent rapport ses prescriptions n'ont pas été réinscrites dans le Code de l'Environnement français).

Règlement (UE) n°1357/2014 de la Commission Européenne du 18 décembre 2014 remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives	<p>HP 7“Cancérogène”: déchet qui induit des cancers ou en augmente l'incidence. Lorsqu'un déchet contient une substance classée au moyen de l'un des codes des classes et catégories de danger et codes des mentions de danger suivants et qu'une des limites de concentration suivantes indiquées dans le tableau 6 est atteinte ou dépassée, le déchet est classé comme déchet dangereux de type HP 7. Lorsque le déchet contient plus d'une substance classée comme cancérogène, la concentration d'une substance individuelle doit être supérieure ou égale à la limite de concentration pour que le déchet soit classé comme déchet dangereux de type HP 7.</p> <p>Tableau 6: Code(s) des classes et catégories de danger et code(s) des mentions de danger relatif(s) aux constituants déchets et limites de concentration correspondantes pour la classification des déchets comme déchets dangereux de type HP 7:</p>
--	--

Code(s) des classes et catégories de danger	Code(s) des mentions de danger	Limite de concentration
Carc. 1A	H350	0,1 %
Carc. 1B		
Carc. 2	H351	1,0 %

Article R541-10 du Code de l'Environnement	<p>I. - En ce qui concerne les propriétés H 3 à H 8, H 10 et H 11, sont, en tout état de cause, considérés comme dangereux les déchets présentant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes : [...]</p> <p>9° Ils contiennent une substance reconnue comme étant cancérogène, des catégories 1 ou 2, à une concentration égale ou supérieure à 0,1 %. [...]</p>
--	--

Cet Article R541-10 du Code de l'environnement voit également ses références de propriétés de danger modifiées par le Règlement (UE) n°1357/2014 de la Commission Européenne du 18 décembre 2014, les propriétés H3 à H8, H10 et H11 deviennent respectivement les propriétés HP3 à HP 8, HP10 et HP11 :

Règlement (UE) n°1357/2014 de la Commission Européenne du 18 décembre 2014 remplaçant l'annexe III de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux déchets et abrogeant certaines directives	<p>HP3 : inflammable</p> <p>HP4 : Irritant — irritation cutanée et lésions oculaires</p> <p>HP5 : Toxicité spécifique pour un organe cible (STOT)/toxicité par aspiration</p> <p>HP6 : toxicité aiguë</p> <p>HP7 : cancérogène</p> <p>HP8 : corrosif</p> <p>HP10 : Toxique pour la reproduction</p> <p>H11 : mutagène</p>
--	---

1.6.1.2. Responsabilité des déchets

L'Article L.541-1-1 du Code de l'environnement définit les notions de **producteur et détenteur de déchets** applicables à tous les déchets et par conséquent aux déchets contenant de l'amiante :

«*Producteur de déchets : toute personne dont l'activité produit des déchets (producteur initial de déchets) ou toute personne qui effectue des opérations de traitement des déchets conduisant à un changement de la nature ou de la composition de ces déchets (producteur subséquent de déchets)* »

«*Détenteur de déchets : producteur des déchets ou toute autre personne qui se trouve en possession des déchets.* »

Le Code de l'environnement précise en outre **les responsabilités qui incombent aux producteurs et détenteurs** :

- **Assurer la gestion des déchets, de leur production à leur élimination, en choisissant des opérateurs habilités.**

Article L. 541-2 du Code de l'environnement :

« Tout producteur ou détenteur de déchets est tenu d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion, conformément aux dispositions du présent chapitre.

Tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de la gestion de ces déchets jusqu'à leur élimination ou valorisation finale, même lorsque le déchet est transféré à des fins de traitement à un tiers.

Tout producteur ou détenteur de déchets s'assure que la personne à qui il les remet est autorisée à les prendre en charge. »

- **Informier l'administration des productions et de la gestion des déchets mise en œuvre :**

Article L.541-7 du Code de l'environnement :

« Les personnes qui produisent (...) sont tenues de fournir à l'administration toutes informations concernant l'origine, la nature, les caractéristiques, les quantités, la destination et les modalités d'élimination des déchets qu'elles produisent, remettent à un tiers (...). »

- **Caractériser les déchets et mettre en œuvre les prescriptions d'emballage, de conditionnement et étiquetage qui leurs sont applicables.**

Article L.541-7-1 du Code de l'environnement :

« Tout producteur ou, à défaut, tout détenteur de déchets est tenu de caractériser ses déchets.

Tout producteur ou détenteur de déchets dangereux est tenu d'emballer ou conditionner les déchets dangereux et d'apposer un étiquetage sur les emballages ou les contenants.

Les conditions et les modalités de la caractérisation des déchets et de l'emballage et du conditionnement et de l'étiquetage des déchets dangereux sont précisées par décret. »

Les mesures opérationnelles qui découlent de ses responsabilités pour les déchets contenant de l'amiante sont détaillées dans le Guide de Prévention INRS - Exposition à l'amiante lors du traitement des déchets.

Les possibilités pour un producteur ou un détenteur d'argumenter sur le caractère non dangereux d'un déchet sont inscrites dans la Circulaire du 03/10/02 relative à la mise en œuvre du décret n°2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets.

1.6.2. Fibres d'amiante

1.6.2.1. Des déchets dangereux

Comme explicité précédemment les déchets contenant de l'amiante sont des déchets dangereux même lorsqu'ils sont liés à des matériaux inertes, principalement en vertu du pouvoir cancérogène des fibres d'amiante qu'ils contiennent.

La justification du classement en déchet dangereux des déchets de FMN tel que l'amiante est explicitée dans le Code de l'Environnement et l'Arrêté du 12 mars 2012 relatif au stockage des

déchets d'amiante pris en application des prescriptions du Code de l'Environnement applicables aux déchets.

Cet arrêté modifie notamment l'Arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux installations de stockage de déchets non dangereux pour ses prescriptions relatives à l'admission de déchets contenant de l'amiante.

Le seuil réglementaire de concentration de 0.1 % d'une substance reconnue comme étant cancérigène, des catégories 1 ou 2 qui conduit au classement en déchet dangereux peut potentiellement servir de base juridique pour justifier d'un classement en déchet non dangereux.



Figure 28 Étiquetage réglementaire pour les produits contenant de l'amiante

<p>Annexe II de l'Article R541-8 du Code de l'Environnement relative aux propriétés qui rendent les déchets dangereux</p>	<p>Les codes nomenclature qui peuvent être attribués aux déchets contenant de l'amiante sont principalement :</p> <p>Deux codes spécifiques aux matériaux de construction ou d'isolation :</p> <p>17 06 01* Matériaux d'isolation contenant de l'amiante.</p> <p>17 06 05* Matériaux de construction contenant de l'amiante.</p> <p>Un code applicable aux vêtements et matériel de désamiantage usagé :</p> <p>15 02 02* Absorbants, matériaux filtrants (y compris les filtres à huile non spécifiés ailleurs), chiffons d'essuyage et vêtements de protection contaminés par des substances dangereuses.</p> <p>D'une manière générale, tous les codes relatifs à la contamination d'un déchet de construction ou de démolition non dangereux par une substance dangereuse (ici de l'amiante) sont applicables :</p> <p>17 01 06* Mélanges ou fractions séparées de béton, briques, tuiles et céramiques contenant des substances dangereuses.</p> <p>17 04 09* Déchets métalliques contaminés par des substances dangereuses.</p> <p>17 05 03* Terres et cailloux contenant des substances dangereuses.</p> <p>17 02 04* Bois, verre et matières plastiques contenant des substances dangereuses ou contaminés par de telles substances</p> <p>17 04 10* Câbles contenant des hydrocarbures, du goudron ou d'autres substances dangereuses.</p> <p>17 09 03* Autres déchets de construction et de démolition (y compris en mélange) contenant des substances dangereuses.</p> <p>....</p> <p><i>Cf liste exhaustive publiée dans le Guide de Prévention – Exposition à l'amiante lors du traitement des déchets de l'INRS.</i></p>
---	--

Article 2 de l'Arrêté du 12 mars 2012 relatif au stockage des déchets d'amiante	<p>(...) « Déchets d'amiante lié à des matériaux inertes : déchets contenant de l'amiante lié à des matériaux de construction inertes ayant conservé leur intégrité relevant du code 17 06 05* de la liste des déchets ;</p> <p>« Déchets de terres amiantifères : déchets de matériaux géologiques naturels excavés contenant naturellement de l'amiante et relevant du code 17 05 03* de la liste des déchets ; ». (...)</p>
---	---

1.6.2.2. Limiter l'exposition humaine aux fibres d'amiante

Quel que soit le résultat de l'évaluation des risques, il est toujours nécessaire de recourir à un ensemble de mesures de prévention combinées entre elles, à la fois organisationnelles et techniques, en particulier de protection collective et de protection individuelle des opérateurs, mais intégrant également des actions de formation et d'information.



Figure 29 Equipements de protection

1.6.3. Fibres de laine de verre, de roche et de laitier

➤ *Compte-rendu de l'entretien avec le FILMM*

La mise en œuvre des isolants de type laine de verre et laine de roche dans les bâtiments s'est particulièrement développée après les chocs pétroliers des années 1970.

Le point d'actualité sur les problématiques liées aux déchets de ces laines minérales avec le FILMM, syndicat national des fabricants de laines minérales manufacturées (laine de verre et laine de roche) réalisé dans le cadre de l'étude amène les commentaires suivants :

Les déchets des matériaux minéraux d'isolation sont des déchets non dangereux (et non inertes).

Ils sont admis dans les installations de stockage de déchets non dangereux ou peuvent être recyclés.

Concernant le gisement actuel et potentiel de déchets de laines minérales, il n'existe pas de statistiques fiables. Tant qu'il n'y a pas de filière de recyclage, le tri n'est pas effectué sur les chantiers. En France, le suivi de ces déchets n'est pas obligatoire contrairement en Allemagne.

Effet levier du diagnostic déchets lors des démolitions de bâtiments ?

Les Articles R. 111-43 à R. 111-49 du Code de la Construction et de l'Habitation ont instauré l'obligation (depuis le 1er mars 2012) de réaliser un diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition de catégories de bâtiments préalablement à toute demande de démolition de

bâtiments de plus de 1 000 m² de Shob ou de bâtiments professionnels ayant accueillis des substances dangereuses.

Le FILMM a actuellement peu de retours sur la mise en œuvre de cette obligation propice sur le fond à l'organisation d'une gestion différenciée des déchets d'isolants.

L'absence actuellement de pénalité financière liée à la bonne réalisation du diagnostic explique en grande partie que cet outil n'est pas l'effet levier escompté sur le développement de filières de valorisation des déchets du secteur du bâtiment.

Recyclage des laines minérales ?

En France, il n'y a pas de filière pérenne dans le recyclage des déchets de laines minérales pour le moment. Seul Rockwool a lancé une initiative Rockcyle (récupération laine de roche et emballage).

En Allemagne, la société Woolrec recycle les fibres minérales en Woolit ® qui est ensuite utilisé comme agents porogènes, par exemple, dans l'argile pour fabriquer des carrelages, des tuiles.

1.6.4. Fibres céramiques réfractaires

➤ Des déchets dangereux avec une prise en charge à géométrie variable

Les déchets de FCR (les surplus, les chutes, les matériaux résultant de la maintenance, les conditionnements, les filtres des installations de ventilation, les sacs d'aspirateur, les équipements de protection respiratoire et cutanée jetables, les linges de nettoyage contaminés, etc.) sont des déchets dangereux. Collectés **dans des sacs spéciaux comportant la même étiquette que les emballages neufs**, ils doivent être envoyés **dans une installation de stockage de déchets dangereux** ou éliminés en centre d'inertage. Si les déchets contiennent d'autres polluants, la présence de ces contaminants doit être également mentionnée lors de la demande de certificat d'acceptation préalable sur une installation de traitement de déchets dangereux.

Selon le rapport de l'AFSSET (actuellement ANSES) de 2007, la gestion des déchets des FCR semble être globalement correcte dans l'industrie de production et de transformation, les rebuts sont essentiellement recyclés et le reste est clairement identifié et éliminé en installation de stockage.

En revanche, la situation apparaît plus préoccupante pour les industries utilisatrices et pour les entreprises de réfection, de maintenance et de démantèlement. Les procédures varient d'une entreprise à l'autre, et les déchets peuvent être orientés en installation de stockage de déchets dangereux ou de non dangereux voir de déchets inertes.

Les quantités de déchets de FCR identifiées par les exploitants des installations de stockage de déchets dangereux s'élèvent à environ 300 tonnes pour l'année 2005. Ce tonnage paraît largement inférieur à ce qui peut être attendu au regard des données de production et d'utilisation sur le territoire français et ne reflète pas tous les secteurs industriels les employant.

Ceci indique que des déchets de FCR sont vraisemblablement en quantités notables stockés ou traités dans d'autres installations de stockage que celles dédiées aux déchets dangereux. Elles peuvent aussi être traitées stratégiquement de façon non différenciées avec les déchets contenant de l'amiante (voir en partie 2 – les retours d'expérience du Groupe EDF).

1.6.5. Fibres de verre à usage spécial

➤ *Aucun site de production en France, mais des sites de transformation*

Selon le rapport de l'AFSSET (2007) relatif aux fibres de verre à usage spécial, les principaux producteurs alimentant le marché européen sont originaires des Etats-Unis avec des filiales en Europe. Cependant, les importations chinoises apparaissent de plus en plus conséquentes. Il n'existe aucune entreprise française et aucun site de production sur le territoire national. La production mondiale actuelle de fibres de verre à usage spécial s'élève à 30 000 tonnes par an dont 2 200 tonnes destinés à la France. Contrairement aux laines minérales d'isolation, les fibres de verre à usage spécial ne constituent qu'un très faible pourcentage du marché des fibres de verre artificielles, environ 1 % de la production annuelle des fibres de verre synthétiques.

➤ *Un traitement des déchets fonction de l'emploi des produits contenant ces fibres*

Les producteurs rappellent que la gestion des déchets de fibres de verre à usage spécial ou de produits contenant des fibres de verre à usage spécial est régie par des règles nationales, régionales et locales strictes applicables aux déchets. Les utilisateurs finaux de produits contenant des fibres de verre à usage spécial sont ainsi invités à consulter les autorités locales pour s'assurer du traitement adéquat de leurs déchets. Ces derniers sont régis par la décision de la Commission 2000/532/CE indiquant leur classification et leur gestion au niveau de l'Union Européenne. Les prescriptions d'élimination en installation de stockage sont précisées par ailleurs sur les étiquettes des produits et/ou dans leurs fiches de données et de sécurité.

Le traitement des déchets résulte principalement de l'application du produit contenant ces fibres qui conditionne le devenir des fibres, notamment pour les filtres. Par exemple, les filtres à très haute efficacité utilisés dans les laboratoires et destinés à retenir des virus hautement pathogènes nécessitent un traitement spécifique d'élimination. **Les producteurs de fibres de verre à usage spécial indiquent que les matières retenues conditionnent, plus que la nature du filtre, le traitement et l'élimination de ces matériaux.**

Les filtres assurant la capture des radioéléments obéissent à la réglementation en vigueur. Une catégorie de filtres à usage spécial contenant des radioéléments à vie courte peuvent être stockés en surface après enfutage et compactage.

Les seuls articles grand public sont les filtres secondaires HEPA contenus dans les aspirateurs. Les producteurs déclarent que la matrice maintenue par des liants et placée dans un cadre est incluse dans le filtre primaire. L'ensemble est éliminé par la filière de déchets ménagers.

1.7. La gestion des risques sanitaires liés à une contamination des eaux par des fibres provenant de matériaux contenant de l'amiante

L'amiante peut être introduit dans l'eau par dissolution des minéraux et des minerais contenant de l'amiante, le déversement d'effluents industriels, la pollution atmosphérique et, dans certains cas, la dégradation des matériaux de toiture en amiante-ciment et des tuyaux en amiante-ciment des réseaux d'alimentation en eau.

Cette dernière contribution à la teneur des eaux en amiante varie en fonction de l'agressivité de ces dernières, qui dépend elle-même de leur pH, de leur alcalinité et de leur dureté. (Source : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/asbestos-amiante/index-fra.php>).

1.7.1. Problématique des canalisations en amiante-ciment

L'amiante-ciment est dans la plupart des cas une application liée se composant de 85 à 90 % de ciment et de 10 à 15 % de fibres d'amiante. Ces fibres sont ancrées dans la masse du ciment solide et remplissent le même rôle que l'acier dans le béton armé. Les fibres peuvent dès lors difficilement être libérées, sauf si ces produits en amiante-ciment sont traités (meulage, découpe, percement, etc.) ou sont abimés à la suite de toute autre intervention agressive. (Source : <http://www.eternit.be/fr/asbest/eternit-et-l-amiante-ciment/>)

1.7.1.1. Contexte français

Le réseau d'eau potable en France représente un linéaire de canalisations de 906 000 km dont la pose a commencé au XIXème siècle. Son extension se poursuit encore mais il est surtout entré dans une phase nécessaire de renouvellement beaucoup trop lente au regard de la vétusté constatée des réseaux. L'état des canalisations en France est effectivement catastrophique, avec 1 litre d'eau sur 4 perdu dans les canalisations, selon le MEDDTL. D'après la dernière enquête « Eau et Assainissement » du ministère de l'Ecologie, l'extension du réseau se poursuit au rythme de 3 750 km par an, tandis que son renouvellement n'a été que de 5 041 km par an. Au rythme actuel des investissements, il faudrait près de deux siècles pour remplacer les canalisations. Une canalisation d'eau potable ne serait changée qu'au bout de 170 ans (906 000 km par an / 5 041 km par an).

Le taux de renouvellement est donc en moyenne de 0,6% par an. L'extension moyenne annuelle du linéaire est de 1,5% par an pour les réseaux d'eau potable et de 3% pour les réseaux d'assainissement.

D'après l'étude Cador de 2002 sur le patrimoine des canalisations d'alimentation en eau potable environ 50% du réseau des canalisations d'eau serait antérieur à 1972. Cette étude cite une durée de vie acceptable de 30 ans pour un réseau, au moins sur le plan économique.

Eléments de synthèse de l'Etude Cador

Classe d'âge	%	Kilomètres
Avant 1950	10	85 000
Entre 1950 et 1970	35	303 000

Figure 30 Tableau d'estimation de l'âge des linéaires (en 2002)

(Source : Cador, J-M. *Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale*, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002)

Matériau	%	Kilomètres
Acier	2,0	16 800
Amiante-ciment	4,2	36 000
Fonte ductile	19,6	166 000
Fonte grise	21,7	185 000
Fontes indifférenciées	12,5	106 000
PVC	39,7	329 000

Figure 31 Tableau d'estimation des linéaires nationaux par matériaux (en 2002)

(Source : Cadot, J-M. Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002)

Tableau 3 : Hypothèses de travail retenues pour l'estimation du renouvellement (en 2002)

Matériau	Périodes de pose observée	Critères de dépose	Durée de vie
PVC	1960-1975	Jointts collés, matériaux friables, mauvais état constaté	50 ans
PVC	Après 1975	Age	75 ans
Amiante-ciment	1950-1985	Mauvais état généralisé en environnement acide	Dépose avant 2015
Fonte grise	1900-1960	Présence généralisée de branchements en plomb, matériau fragile	Dépose avant 2015
Fonte grise	1960-1970	Age	75 ans
Acier	1930-1960	Présence généralisée de branchements en plomb, matériau fragile	Dépose avant 2015

Acier	Après 1960	Age	75 ans
PEHD	Actuelle	Age	100 ans
Fonte ductile	Actuelle	Age	100 ans

Figure 32 Tableau d'hypothèses de travail retenues pour l'estimation du renouvellement (en 2002)
 (Source : Cadot, J-M. *Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale*, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002)

1.7.1.2. Risque de contamination de l'eau potable ?

Considérant la vétusté des réseaux et la lenteur du remplacement des canalisations, la question de la présence de fibres d'amiante dans l'eau potable en FRANCE peut se poser.

En effet, des eaux très agressives peuvent attaquer la matrice en ciment et causer par conséquent l'émission de fibres dans l'eau en circulation dans les conduits. Les conduits en amiante-ciment ne sont donc pas recommandés pour une utilisation dans des conditions aussi hautement corrosives, sauf s'ils sont protégés par un revêtement de protection spécial. (Source : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/asbestos-amiante/index-fra.php>).

Avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de FRANCE du 14 octobre 1997 sur la toxicologie de l'amiante spécifique au tube digestif : « L'amiante peut se retrouver dans l'eau de distribution par contamination des nappes phréatiques, d'une part, par contact avec des dépôts naturels d'amphiboles ou de serpentines ainsi qu'avec des décharges de déchets d'amiante et, d'autre part, par relargage des fibres contenues dans les canalisations en amiante-ciment. »

Les résultats de la plupart des études publiées à ce jour indiquent que l'eau des sources contient déjà des fibres d'amiante (la plupart d'une longueur inférieure à 1 (m) avant de passer par le système de conduits en amiante-ciment, souvent en quantité atteignant plusieurs millions par litre, et on convient, en règle générale, que les conduits en amiante-ciment n'accroissent pas sensiblement le contenu de l'eau en fibres d'amiante, et que les quantités trouvées sont celles que l'on retrouve dans l'environnement.

(Source : <http://www.chrysotile.com/fr/chrysotile/hltsfty/quest6.aspx>).

D'après une étude canadienne¹, réalisée à l'échelle nationale à 71 points d'échantillonnage répartis d'un bout à l'autre du Canada, l'érosion des tuyaux en A/C semble avoir contribué de façon mesurable à la teneur des eaux en amiante à deux endroits seulement, bien que ces tuyaux aient été utilisés dans environ 19 pour cent des réseaux d'alimentation en eau. (Source : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/asbestos-amiante/index-fra.php>).

¹ Chatfield, E.J. et Dillon, M.J. Enquête sur les fibres d'amiante dans les approvisionnements en eau potable au Canada. Rapport de la Direction de l'hygiène du milieu 79-DHM-34, ministère de la Santé nationale et du Bien-être social, Ottawa (1979).

1.7.2. Problématique des matériaux de toiture en amiante-ciment

Certains indices laissent penser que les anciens toits en amiante-ciment risquent d'être altérés sous l'influence du temps, du vent ou d'importantes variations de température (gel...). Le produit en amiante-ciment peut par conséquent être endommagé, et les fibres risqueraient alors d'être emportées par l'eau de pluie. (Source : <http://www.etsnit.be/fr/asbest/etsnit-et-l-amiante-ciment/>)

1.7.3. Ingestion d'eau potable contaminée par l'amiante : effets sur la santé

1.7.3.1. Etudes épidémiologiques

Bon nombre d'études épidémiologiques ont été réalisées afin d'étudier le lien entre la mortalité par cancer ou l'incidence des cas de cancer notamment et l'ingestion d'amiante dans l'eau potable.

La majorité de ces études n'ont pas donné de résultats cohérents montrant un lien entre les deux.

(Cf Annexe Bibliographie du présent rapport).

1.7.3.2. Etudes sur l'exposition à l'amiante par ingestion (ou contamination de l'eau)

1.7.3.2.1. Etudes animales

La pénétration des fibres par d'autres voies que l'inhalation a été étudiée chez l'animal. La migration des fibres à travers la paroi gastro-intestinale n'a pas été démontrée. L'exposition de l'animal par voie orale ne provoque que peu ou pas de lésions, mêmes à de fortes doses (1 % de chrysotile, d'amosite, de crocidolite ou trémolite dans la nourriture). (Source : INRS, *Fiche toxicologique FT 145 – Amiante, édition 2009*).

(Cf Annexe Bibliographie du présent rapport).

1.7.3.2.2. Avis des institutions officielles

Avis du Conseil supérieur d'hygiène publique de FRANCE du 14 octobre 1997 sur la toxicologie de l'amiante spécifique au tube digestif :

« En dehors des cancers du poumon et des mésothéliomes, considérés comme caractéristiques de l'exposition à l'amiante, des cancers du tractus digestif (estomac, intestin grêle, côlon, rectum) et des organes annexes (foie, vésicule biliaire) sont fréquemment rencontrés chez les travailleurs exposés. En revanche, le chrysotile, l'amosite et la crocidolite n'exercent pas d'effet cancérigène ou co-cancérigène, en cas d'administration orale, à long terme et à forte dose, dans le régime chez les rongeurs.

« La population générale est potentiellement exposée à l'amiante par ingestion de l'eau du réseau de distribution, de boissons et aliments au contact d'adhésifs et de résines de polyester armées, ainsi que de diverses préparations pharmaceutiques et dentaires. La Food and Drug Administration (FDA) n'a pas statué sur les niveaux de contamination tolérables dans les denrées alimentaires, considérant que ces derniers sont suffisamment faibles pour ne pas entraîner de risque de santé publique.

« Les études portant sur l'incidence des cancers, et notamment des cancers digestifs, en liaison avec la présence de fibres d'amiante dans l'eau menées depuis plus de vingt ans en Amérique du Nord

n'ont pas mis en évidence d'association positive très nette entre la survenue des cancers digestifs et la teneur en fibres de l'eau de boisson. En 1982, l'Agence internationale de recherches sur le cancer n'a pas conclu à l'existence d'un effet cancérigène chez l'homme de l'amiante ingéré avec l'eau de boisson. L'Organisation mondiale de la santé a émis un avis identique en 1996 et n'a pas établi de valeur guide pour les fibres d'amiante dans l'eau. »

Des informations de même nature figurent dans le rapport d'activité 1997 du Conseil Supérieur D'Hygiène Publique de FRANCE.

Avis de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 1993 :

“Asbestos is introduced into water by the dissolution of asbestos-containing minerals and ores as well as from industrial effluents, atmospheric pollution, and asbestos-cement pipes in the distribution system. Exfoliation of asbestos fibres from asbestos-cement pipes is related to the aggressiveness of the water supply. Limited data indicate that exposure to airborne asbestos released from tapwater during showers or humidification is negligible.

Asbestos is a known human carcinogen by the inhalation route. Although well studied, there has been little convincing evidence of the carcinogenicity of ingested asbestos in epidemiological studies of populations with drinking-water supplies containing high concentrations of asbestos.

Moreover, in extensive studies in animal species, asbestos has not consistently increased the incidence of tumours of the gastrointestinal tract. There is, therefore, no consistent evidence that ingested asbestos is hazardous to health, and thus it was concluded that there was no need to establish a health-based guideline value for asbestos in drinking-water.” **Avis confirmé en 1996.**

Haute Autorité de Santé :

«Eau et sédiments.

Les études écologiques n'ont montré aucun sur-risque de cancer chez les personnes consommant une eau contaminée par les fibres d'amiante (dépôts de serpentine ou conduites en amiante-ciment). »

(Source : http://www.hassante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/200903/amiante_environnement_ale_fiche_medecin_version_finale.pdf).

2. Deuxième partie :

**Revue critique des procédures de déconstruction
d'ouvrages et d'équipements à l'origine de productions
de déchets amiantifères et de déchets de matériaux
FMA en général**

2.1. Objectifs de la revue critique des opérations de déconstruction

Une revue critique de retours d'expérience de procédures de déconstruction d'ouvrages et d'équipements à l'origine de productions de déchets amiantifères et autres déchets FMA est essentielle dans le contexte d'analyse des technologies de traitement de matériaux fibreux en fin de vie objet de cette étude.

En effet, elle permet :

- **d'appréhender précisément les caractéristiques des déchets en entrée de procédé, afin d'identifier les leviers et freins au développement des nouvelles technologies décrites dans la troisième partie de l'étude : nature des déchets, flux, chronologie de production, conditionnement, ...**
- **de relativiser l'importance des coûts de traitement des déchets (notamment des déchets amiantifères) par rapport au coût des opérations de déconstruction proprement dites,**
- **de comprendre toute l'importance, pour un même ouvrage ou équipement, de raisonner les opérations de désamiantage dans le cadre d'une approche globale avec les autres opérations de déconstruction.**

En outre, elle permet indirectement d'alimenter les réflexions sur la conception et la mise en œuvre de matériaux FMA en général dans les projets actuels (et à venir) d'ouvrages et d'équipements plus économes en ressources énergétiques et non énergétiques.

Les retours d'expérience analysés ont été définis en concertation avec le Comité de Suivi de l'étude en intégrant les problématiques rencontrées par les membres de RECORD dans leur gestion de patrimoine immobilier et mobilier.

Ainsi, quatre typologies opérations ont été retenues :

- ✓ la déconstruction totale d'un site industriel : équipements et bâtiments,
- ✓ la déconstruction d'équipements,
- ✓ la déconstruction d'un bâtiment tertiaire complexe (type siège d'entreprise),
- ✓ la déconstruction d'un bâtiment tertiaire de bureaux usuel.

L'analyse a été conduite, selon les opérations, à travers conjointement :

- des visites techniques des sites,
- des interviews
 - soit des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre,
 - soit des entreprises prestataires de déconstruction et désamiantage.

afin de bénéficier de différents points de vue d'acteurs impliqués dans chaque retour d'expérience face à une préoccupation commune : désamianter et déconstruire.

2.2. Démarche méthodologique

Les retours d'expérience d'opérations de déconstruction d'ouvrage ou d'équipements contenant des matériaux à base de fibres minérales naturelles (FMN), tout particulièrement d'amiante et de fibres minérales artificielles (FMA) sont étudiés en s'appuyant sur les éléments d'analyse suivants :

- 1- *Caractéristiques des ouvrages ou équipements déconstruits*
- 2 - *Chronologie du chantier de déconstruction*
- 3 - *Résultats du diagnostic amiante*
- 4 - *Résultats du diagnostic déchets préalable*
- 5 - *Caractéristiques des marchés de maîtrise d'œuvre et de travaux*
- 6 - *Intervenants du chantier*
- 7 - *Procédures de déconstruction et de traitement mises en œuvre*
- 8 - *Focus sur le choix et les caractéristiques des installations de traitement des matériaux FMN*
- 9 - *Optimisation des modes de production de déchets amiantifères et matériaux FMA*
- 10 - *Aspects santé et sécurité spécifiques liés aux procédures de déconstruction mises en œuvre*
- 11 - *Reporting des « aléas en cours de chantier »*
- 12 - *Récolement de fin de chantier relatif au diagnostic portant sur la gestion des déchets issus de la démolition*
- 13 - *Autres aspects de l'opération utiles à sa compréhension et son analyse*
- 14 - *Reportages photos et/ou vidéos pour illustration de l'opération.*

2.3. Opération de déconstruction totale d'un site industriel : équipements et bâtiments

Le chantier de déconstruction des ouvrages et équipements de la centrale de production thermique EDF de Richemont a servi de support pour les investigations de terrain menées dans le cadre de l'analyse des procédures de déconstruction totale de sites industriels.

Ce chantier récent **capitalise les retours d'expérience du Groupe EDF en matière de maîtrise technique et financière des opérations de gestion des matériaux fibreux en fin de vie** : il servira à illustrer différents aspects de leur déconstruction.

En revanche, étant en cours de réalisation, il ne permet pas d'aborder l'ensemble des aspects de la déconstruction prévus dans le cadre de l'étude notamment, le bilan final de gestion des déchets, les innovations les plus récentes en matière de diagnostic préalable, certaines évolutions des procédures de désamiantage rendues nécessaires par l'évolution de la réglementation en matière de protection des personnes.

Dans ce contexte, certains aspects de la déconstruction totale de bâtiments seront analysés en s'appuyant sur des chantiers similaires en termes de gestion des matériaux fibreux en fin de vie.

Les éléments d'analyse développés ci-après peuvent être considérés, in fine, comme génériques pour les chantiers de déconstruction totale de site industriels de production thermique du Groupe EDF ; une trentaine de sites de production thermique sont gérés actuellement par le centre de post exploitation d'EDF.



Figure 33 Vue d'ensemble du site de la Centrale Thermique de Richemont (Source : EDF)

2.3.1. Caractéristiques des ouvrages déconstruits

Les centrales thermiques classiques produisent de l'électricité par détente dans un groupe turbo alternateur de vapeur d'eau à haute pression produite grâce à l'énergie libérée par la combustion de gaz, charbon ou fioul.

Les centrales thermiques sont constituées de **bâtiments de grande hauteur** (environ 100 m de hauteur) à structure métallique, béton, ou mixte, abritant les équipements des procédés de production thermique : ensemble chaudière équipée de brûleurs, groupes turbo-alternateurs (GTA), réchauffeurs, condenseurs,... Elles comportent également des équipements de traitement des fumées de combustion et des **cheminées** de hauteur supérieures aux bâtiments pour leur évacuation (environ 150 m de hauteur).

La très grande majorité des équipements est **calorifugée au moyen d'isolants** maintenus en place autour des équipements par des capotages métalliques.

Une centrale thermique comporte généralement **plusieurs tranches de production** fonctionnant en parallèle, chaque tranche correspondant à l'ensemble d'équipements nécessaires à la production d'électricité à partir du combustible. Les **différentes tranches d'une centrale ne sont pas obligatoirement de puissance et de conception identiques** car leur mise en œuvre peut correspondre à plusieurs phases d'investissement.

L'énergie électrique produite, après élévation de sa tension dans un **poste de transformation**, est acheminée par lignes à très haute et à haute tension vers ses utilisateurs.

Un site de production thermique comporte également des bâtiments d'exploitation : vestiaires, ateliers, magasins, bureaux identiques à ceux rencontrés sur tout type d'entreprise industrielle.

En matière d'organisation de la déconstruction, et en particulier de retrait des matériaux fibreux, les caractéristiques suivantes des ouvrages et équipements :

- grandes hauteurs,
- état de conservation parfois dégradé,
- forte imbrication des équipements entre eux (couplée à des schémas complexes des parcours des tuyauteries reliant les équipements),
- taux d'occupation élevé des différents planchers des bâtiments,
- circulations par escalier métalliques étroits au sein des ouvrages et pour accéder aux équipements,

induisent :

- ✓ un travail manuel dans des espaces étroits difficiles d'accès pour les opérateurs,
- ✓ des espaces d'entreposage des déchets issus du désamiantage restreints (voire inexistant) nécessitant une évacuation au fil de l'eau des déchets,
- ✓ le recours à des contenants de pré-collecte des déchets de faibles dimensions type big bag d'un mètre cube pour acheminer les déchets de leur lieu de production à leur lieu de regroupement sur le site, avant enlèvement pour acheminement vers leur lieu de traitement,
- ✓ l'installation de montes charges, ensemble ponts roulants et autres dispositifs de manutention spécifiques pour le chantier.



Figure 34 Vues de différents équipements donnant un aperçu de la complexité des situations d'accès aux équipements et ouvrages à désamianter (*Source : EDF*)

2.3.2. Chronologie du chantier de déconstruction

Un chantier de déconstruction d'une centrale thermique s'étend sur plusieurs années correspondant au déroulé des phases suivantes :

- ✓ **Planification technique et budgétaire** du chantier en regard du programme national de déconstruction des centrales thermiques en fin d'exploitation ; plusieurs années sont nécessaires pour les ouvrages construits dans les années 50 à 60 en raison notamment des matériaux contenant de l'amiante présents dans leurs structures et leurs équipements.
- ✓ **Mise en sécurité** : libération des locaux, nettoyage, retrait des fluides (fioul,...), sécurisation des accès.
- ✓ **Préparation du chantier de déconstruction** : expertise de l'état de conservation des structures des bâtiments, réalisation des diagnostics notamment amiante et déchets, aménagement du chantier (fluides, dispositifs de manutention, accès aux équipements et aux différents planchers et toitures,...),
- ✓ **Opérations de désamiantage des équipements et bâtiments**. Durant cette phase spécifique le désamiantage concerne l'ensemble des équipements accessibles aux opérateurs du chantier. Il subsiste à l'issue de cette phase des ouvrages et équipements qui ne peuvent être désamiantés du fait principalement de leurs caractéristiques d'implantation : équipement situé sur un plancher jugé insuffisamment résistant pour garantir la sécurité des opérateurs de désamiantage ou de dimensions ne permettant pas la mise en œuvre du confinement, équipement enchâssé entre des murs porteurs, étanchéité de toitures terrasses située à grande hauteur,...
- ✓ **Déconstruction des ouvrages**, et simultanément **désamiantage complémentaire** pour des **équipements et ouvrages accessibles uniquement avec des dispositifs mécaniques**.

La déconstruction des ouvrages a lieu en deux étapes :

- Les cheminées sont généralement déconstruites en premier et séparément des autres ouvrages en raison des sujétions techniques liées à leur grande hauteur. Selon leur état de conservation et leur emplacement par rapport aux autres ouvrages et l'environnement et le voisinage du site, la technique est différente : abattage à l'explosif ou grignotage à la pince hydraulique.



Figure 35 Abattage à l'explosif des cheminées de la centrale de Richemont (*Source : EDF*)



Figure 36 Grignotage des cheminées de la centrale de Cordemais (Source : EDF)

- Les bâtiments de la centrale ; cette deuxième étape débute par la dépose des gros équipements (Groupe Turbo Alternateur, corps de chauffe, dépoussiéreurs, pompes,...). Ensuite, les structures métalliques et béton sont déconstruites par affalement mécanique progressif ponctué d'opérations d'abattage à l'explosif pour des ouvrages spécifiques comme les socles des chaudières.
- ✓ **Dépollution locale des sols**, le cas échéant,
- ✓ **Réaménagement des états de surfaces** du site en fonction des usages futurs prévus par le programme de post exploitation du site.

Les opérations de désamiantage ont lieu très majoritairement (en termes de volumes de déchets produits) lors de la phase spécifique de désamiantage et sont complétées par des opérations de désamiantage complémentaires lors de la déconstruction.

En conséquence, une massification des flux de déchets contenant de l'amiante existe de fait et peut constituer un atout pour la mise en œuvre de procédés de prétraitement ou traitement mobiles sur site.

2.3.3. Diagnostic amiante

La localisation des matériaux contenant de l'amiante est **classiquement réalisée, comme le prescrit la réglementation, par analyse de plans et descriptifs** retraçant l'historique de la construction et des interventions d'extension et de réhabilitation successives en cours d'exploitation des équipements et ouvrages.

Cette démarche n'est pas adaptée aux ouvrages tels que les centrales thermiques comme le démontre à titre d'exemple le cas de la centrale de Richemont :

- ✓ La recherche documentaire des plans et descriptifs retraçant l'histoire des ouvrages et équipements a abouti à la collection d'environ 13 000 plans datant pour les premiers des années 1950 et pour les derniers des années 2000. Certains plans comportent des informations en contradiction avec la réalité : **absence d'amiante dans des équipements lors des travaux de désamiantage alors que les plans en indiquaient la présence et inversement.**
- ✓ Malgré le foisonnement des documents, **certaines parties d'équipements ou d'ouvrages sont insuffisamment décrites.**
- ✓ L'analyse documentaire ne répond pas à **l'objectif d'exhaustivité du recensement des matériaux contenant de l'amiante souhaitée par EDF** au regard des prescriptions réglementaires.

En conséquence, **EDF a développé une démarche méthodologique spécifique d'identification, de localisation et de caractérisation basée sur une cartographie en 3 dimensions** des équipements et des ouvrages devant faire l'objet d'un désamiantage :

- **Identification des ouvrages et équipements** susceptibles de contenir des matériaux amiantés alimentée conjointement par :
 - la **capitalisation de retours d'expérience** d'opérations de maintenance et entretien des équipements de ses centrales en exploitation et de chantiers de déconstruction achevés (19 cheminées et 11 centrales à ce jour),
 - des **sondages destructifs d'environ 30 cm² de parois complexes, de gaines, en maillage serré** (correspondant à titre d'exemple sur la centrale de Richemont à 3500 points de mesures).
- **Génération d'images 3D** décrivant les dimensions et volumétries de ces équipements et ouvrages remarquables par relevé et géolocalisation de points directement sur site (projection laser),
- Utilisation des images 3D comme support pour produire un **rapport de diagnostic amiante présentant pour l'ensemble des ouvrages et équipements une cartographie précise sous forme de zonage couleur des matériaux contenant de l'amiante (en rouge) et des autres matériaux (en vert).**

[illustrations à insérer en concertation avec EDF : extrait de diagnostic amiante avec images 3D]

La capitalisation des retours d'expérience d'EDF a permis d'élaborer un **document de référence** d'utilisation obligatoire par les diagnostiqueurs amiante sollicités par EDF pour ses projets de désamiantage.

[illustrations à insérer en concertation avec EDF : extrait de la réquisition amiante EDF]

Les 3500 points de sondages évoqués dans le cadre de la centrale de Richemont sont un minimum à réaliser par le diagnostiqueur amiante ; il est de la responsabilité de ce dernier d'en réaliser davantage pour répondre **l'obligation de résultats qui lui est assignée par la réglementation.**

Le budget affecté à la réalisation du diagnostic amiante d'une centrale a été multiplié par 40 suite au développement de cette démarche de diagnostic par cartographie 3D, mais

représente pour autant moins de 3% du montant total du coût des opérations de désamiantage d'une centrale telle que celle de Richemont.

En outre, le retour d'expérience et les différentes démarches entreprises par EDF ont permis de limiter les avenants à moins de 5% sur ces derniers chantiers.

La cartographie en 3D des équipements et ouvrages à désamianter permet l'identification et la quantification précises des matériaux contenant de l'amiante par catégorie.

En conséquence, la cartographie 3D,

- ✓ accroît les possibilités de maîtrise des risques pour la santé des opérateurs de désamiantage,
- ✓ constitue un support opérationnel adapté à la mise en œuvre d'un tri des matériaux contenant de l'amiante lors des opérations de désamiantage,
- ✓ est un facteur de maîtrise budgétaire.

2.3.4. Diagnostic déchets préalable

La démarche d'identification et de quantification des matériaux en **fibre céramique réfractaire (FCR) est identique à celle appliquée aux matériaux contenant de l'amiante.**

La cartographie des matériaux contenant de l'amiante s'appuie sur une description de tous les équipements pourvus de calorifugeages et ouvrages isolés thermiquement, à laquelle est associée une lecture de la nature du matériau isolant en jeu ; pour mémoire, en zonage rouge sont représentés les matériaux contenant de l'amiante et en zonage vert les matériaux utilisés comme isolants thermiques qui n'en contiennent pas.

En conséquence, une cartographie des matériaux contenant des fibres minérales artificielles, type laine de verre, existe d'ores et déjà, mais n'est pas explicitement mise en avant lors de la définition de procédures de déconstruction sélectives.

La gestion des matériaux contenant des fibres minérales artificielles n'est pas dissociée de celle des autres déchets non dangereux non valorisables rencontrés sur une opération de déconstruction d'une centrale.

2.3.5. Caractéristiques des marchés de maîtrise d'œuvre et de travaux

La maîtrise d'ouvrage est assurée au sein d'EDF par le CPE (Centre Post Exploitation) ; le CIT (Centre d'Ingénierie Thermique) est assistant au maître d'ouvrage (et sur certains sites, maître d'ouvrage délégué).

La maîtrise d'œuvre est assurée par le titulaire du marché de travaux,

Le suivi du chantier est assurée par le CIT d'EDF dont les principaux atouts (garant de la réussite d'une opération de déconstruction) sont de :

- disposer en interne des compétences d'ingénierie nécessaires pour élaborer et mettre en œuvre les marchés de prestations et de travaux liés aux opérations de déconstruction,
- d'effectuer un choix des prestataires et entreprises dans le cadre un dialogue **entre des ressources techniques et des acheteurs compétents non seulement en ingénierie financière mais également en génie civil et procédés industriels,**

Les marchés de maîtrise d'œuvre complémentaire et de travaux comportent une part prépondérante **d'exigences de moyens** calibrées en fonction des exigences de résultats du Groupe EDF en matière de déconstruction.

Le recours à des exigences de performances est limité actuellement en matière de désamiantage compte tenu du faible panel de procédés de traitement disponibles ; il est plus élevé pour les différentes opérations de déconstruction post désamiantage.

La participation à l'innovation en matière de gestion des déchets est rendue possible par la maîtrise des diagnostics amiante et déchets.

2.3.6. Intervenants du chantier

Les marchés de travaux relatifs aux opérations de désamiantage et de déconstruction sont distincts.

Cette séparation vise à éviter de mettre les entreprises de désamiantage en situation de sous traitance d'entreprises de déconstruction pour la première étape de désamiantage.

En revanche, pour l'étape de déconstruction les marchés sont établis avec des entreprises de déconstruction en association avec des intervenants qualifiés pour les prestations de désamiantage des équipements et ouvrages accessibles uniquement avec des dispositifs mécaniques.

Pour la déconstruction de sites industriels, la séparation des marchés de désamiantage et de déconstruction ne semble être ni un atout ni une contrainte vis-à-vis la mise en œuvre de nouveaux procédés de traitement de l'amiante.

2.3.7. Procédures de déconstruction et de traitement mises en œuvre

Les procédures de désamiantage mises en œuvre permettent un tri sélectif des matériaux contenant de l'amiante en différentes catégories : canalisations en fibrociment, panneaux de bardage, calorifuges, ...

Le choix des modes de traitement oscille pour les matériaux contenant de l'amiante entre le procédé par torche à plasma et l'élimination en installation de stockage de déchets dangereux.

Le procédé par torche à plasma est réservé aux déchets de calorifugeages qui représentent globalement 20 % des tonnages de déchets contenant de l'amiante.

Le mode de traitement des matériaux à fibres minérales artificielles est l'élimination en installation de stockage de déchets dangereux.

Les solutions de traitement des déchets adoptées par le maître d'ouvrage sont celles proposées par les entreprises en charge des opérations de désamiantage ou déconstruction.

Le choix des procédés de traitement est également guidé par ses conséquences réglementaires en matière de responsabilité du producteur de déchet.

Le coût de traitement des déchets contenant de l'amiante représente une faible part du coût global des opérations de désamiantage : il en résulte une priorisation des actions de recherche et développement sur les procédés de désamiantage par rapport aux solutions de traitement.

Les conséquences des choix des procédés de traitement en matière de responsabilité du producteur de déchet sont prépondérantes par rapport aux conséquences économiques.



Figure 37 Exemple de sas de confinement des ouvrages à désamianter (Source : EDF)

2.3.8. Aspects santé et sécurité spécifiques liés aux procédures de déconstruction mises en œuvre

Les procédures mises en œuvre en matière de santé et sécurité ne vont pas au-delà des exigences réglementaires, mais il convient de rappeler que la qualité des diagnostics mis en œuvre (cartographie) concoure à sécuriser l'intervention des personnels lors des opérations de déconstruction.

2.4. Opération de déconstruction d'équipements

Le site de l'entreprise SME qui intervient pour le désamiantage et la déconstruction de matériel roulant SNCF a servi de support pour les investigations de terrain.

Le site repris par SME en 1986 a été créé en 1953 à CULOZ (01) (ex IMEX) ; il est situé dans l'emprise des terrains de la gare, en bordure de voie ferrée avec un embranchement rail.

L'activité historique est la valorisation de métaux et notamment l'activité de démolition ferroviaire et de recyclage des rails.

Les problématiques liées à l'amiante sont apparues avec l'émergence des réglementations : l'activité de désamiantage a débuté en 1964 avec au départ seulement la déconstruction des voitures de marchandises dont le toit était amianté suivi par le désamiantage des voitures voyageurs à partir de 1996.

Le Chiffre d'Affaire de SME en 2014 est de 28 M € dont 2,2 M € (moins de 10%) pour l'activité de désamiantage.

90% de l'activité de désamiantage concerne le matériel roulant de la SNCF, le restant des activités de désamiantage concerne essentiellement la dépollution de pièces (moteurs, vannes de barrage... etc., pour différents clients dont le Groupe EDF).

A partir de 1996, SME a commencé à développer une **installation spécifique pour le désamiantage du matériel ferroviaire roulant** : l'installation est brevetée et représente un investissement de 4 M € HT.

2.4.1. Méthodologie de désamiantage

La méthode utilisée pour le désamiantage est un sablage et grenailage dans un bâtiment en dépression et sous adduction d'air pour le personnel travaillant en zone confinée (ventilation d'air en circuit fermé).

Le procédé employé est un **procédé basse pression** (3-4 bars) utilisant une buse « venturi » provoquant un effet cyclonique (le sable « tourbillonne ») qui améliore l'efficacité du sablage. Le sable utilisé est issu d'un déchet vitrifié provenant d'incinérateur : son nom commercial est le « Rugos ».

L'opération de désamiantage occupe une équipe de 4 personnes par véhicule traité ; les différentes **étapes du procédé de désamiantage** sont les suivantes :

1. **Dégarnissage des voitures**
2. **Retrait de la laine de verre sur les parois**
3. **Grattage / décapage**
4. **Sablage (retrait des peintures amiantées)**
5. **Nettoyage**
6. **Analyse/ contrôle libérateur**

Le désamiantage complet d'une voiture demande **2,5 jours auxquels il faut ajouter une journée de contrôle libérateur**.

Le bâtiment est uniquement entrant c'est-à-dire que les véhicules entrent et sortent par le même côté du bâtiment. Un aménagement traversant permettrait d'accélérer le procédé en permettant de

commencer le traitement d'une nouvelle voiture pendant que la précédente passe en zone de contrôle libératoire (en sachant que chaque zone est soumise à des contraintes réglementaires d'empoussièrement décroissantes)

Sur ce site, du fait de la durée de traitement d'une voiture et de la typologie des bâtiments, SME a une capacité maximale de traitement d'environ 100 voitures / an.

2.4.2. Méthodologie d'identification des zones amiantées

Les véhicules traités correspondent à des produits relativement standardisés et la SNCF **fournit les documents permettant d'identifier les zones qui au moment de la fabrication ont reçu un traitement par des produits amiantés.**

En revanche, il existe rarement des documents permettant **d'identifier la présence d'amiante due à des interventions de maintenance** au cours de la vie des matériels.

A réception d'un nouveau matériel, SME procède à un **diagnostic sur la base des plans fournis par la SNCF et de sondages supplémentaires.**

Ce diagnostic est donc double :

- Vérification de la présence d'amiante en fonction des documents fournis.
- Tests complémentaires sur des zones suspectes et parfois aléatoires.

Ceci représente **350 à 400 prélèvements par rame de transport.**

Ensuite, SME effectue un diagnostic lors de l'arrivée d'une deuxième rame similaire : vérification à nouveau sur la base des plans et des tests complémentaires réalisés sur la 1^{ère} rame, puis tests complémentaires sur les zones suspectes identifiées sur la 2^{ème} rame.

Une fois ce diagnostic établi, SME compile l'ensemble des zones amiantées. **Cette compilation sert alors de base de travail pour toutes les rames suivantes.**

Le diagnostic préalable lors de la réception de nouveaux matériels est effectué par **une entreprise extérieure, présente en quasi permanence sur le site SME** (société INFINI Expertise de Chambéry) qui bénéficie donc d'un retour d'expérience important.

L'intervention sur un matériel relativement standardisé et l'emploi d'une entreprise extérieure, (toujours la même) pour le diagnostic amiante permet un retour d'expérience important et accroît la fiabilité du diagnostic.

De même, la démarche itérative d'identification des zones suspectes permet au fil du temps un développement des connaissances des impacts des opérations de maintenance sur la teneur des rames en éléments amiantés.

2.4.3. Les différents procédés de désamiantage testés par SME

Le procédé de sablage utilisé chez SME est le même depuis 1996. En effet, la société a essayé d'autres procédés mécaniques, ou basés sur des additifs chimiques, mais le sablage reste à son avis le plus efficace, même si des procédés alternatifs restent adaptés dans des cas spécifiques et sur des zones limitées en termes de surfaces à traiter.

Les technologies alternatives testées sont les suivantes :

2.4.3.1. Cryogénie

Cela nécessite une mise en œuvre complexe (azote liquide / pellets CO2 / projection sous une pression de 11bars) qui entraîne des **problèmes de sécurité pour l'opérateur** en cas de rupture d'un flexible et de l'inconfort lié au froid. De plus, le coût total de l'opération (désamiantage et traitement des déchets) est élevé.

2.4.3.2. Hydro décapage

Cette méthode génère des **problèmes liés à la diffusion des fibres**. En effet, l'amiante étant hydrophobe, le décapage à l'eau entraîne une nébulisation des fibres et augmente l'empoussièrément.

L'utilisation d'un tensio-actif permet de limiter cet effet mais va entraîner un encrassement rapide des buses.

De plus, il existe un problème dans la gestion des effluents liquides qui sont chargés de fibres mais aussi d'autres polluants tels que métaux lourds, solvants issus des peintures.

Tout ceci rend cette méthode moins performante par rapport au sablage employé par SME.

2.4.3.3. Grenailage

Le grenailage est utilisé essentiellement pour la dépollution de pièces métalliques.

2.4.3.4. Produits chimiques

Les tentatives de SME pour utiliser certains produits chimiques n'ont pas été concluantes.

Des opérations ont notamment été menées avec la société TIA (société italienne ayant dépollué 3000 voitures en Italie en utilisant un produit chimique) et contrairement aux résultats obtenus en Italie, le produit s'est avéré peu efficace sur le matériel SNCF : **faible performance liée aux caractéristiques des peintures**. Il s'avère que le type de revêtement amianté des voitures françaises est totalement différent de celui des voitures italiennes.

Les autres produits essayés (type SOLVEMUL) sont **très toxiques** (contact / inhalation) et génèrent de **grandes difficultés dans leur mise en œuvre pour la sécurité des employés mais aussi dans la gestion des effluents et déchets solides issus du traitement**.

Cependant, ces produits peuvent ainsi avoir un réel intérêt pour des opérations de maintenance, très localisées. Ils permettent d'intervenir avec des contraintes de mise en œuvre allégées mais ne sont pas adaptés pour le désamiantage de grandes surfaces.

2.4.4. Gestion des déchets et données économiques

Dans un véhicule à traiter, le déchet amianté se résume à la peinture intérieure des voitures.

Dans une voiture on trouve environ 150 kg de peinture sèche contenant 10 à 15% d'amiante, soit 15 à 22kg. Le désamiantage nécessite 2,5 tonnes de sable de décapage. Le sable ne pouvant être réutilisé, l'opération génère environ 3 tonnes de déchets / voiture.

Ce déchet est ensuite enfoui en Installation de Stockage de Déchets Dangereux (ISDD – Sita Bellegarde) pour un coût d'environ 300 €/HT /tonne (transport inclus).

Le coût de désamiantage total d'une voiture est de 30 à 35.000 €HT lié particulièrement aux coûts de personnel, des consommables et à l'amortissement.

Le cout de gestion du déchet (environ 900 €HT / voiture) reste donc relativement faible au regard du cout global de l'opération de désamiantage : il n'est donc pas une priorité pour le choix d'une technologie alternative.

Le choix du procédé de désamiantage est déterminé avant tout par son efficacité et son impact sur l'environnement de travail : sécurité des opérateurs et limitation de l'empoussièremment, gestion des effluents liquides.

Même si le procédé par sablage accroît la quantité de déchet amianté (3 tonnes de déchet amianté / voiture pour environ 20 kg d'amiante), il est préféré à une autre solution technologique l'enjeu économique lié à l'élimination du déchet restant secondaire au regard du cout total de l'opération de désamiantage.

2.4.5. Aspects réglementaires

2.4.5.1. L'installation

L'installation est confinée, avec un **système de contrôle et mesure d'empoussièremment et de filtration** répondant aux normes en vigueur (notamment les nouvelles exigences de la réglementation 2012 concernant l'empoussièremment).

Concernant les rejets, la société SME ne doit pas dépasser 5 fibres par litre d'air, qui correspond au code de la santé publique, en cas de dépassement SME doit alerter le Préfet du département.

Les exigences de contrôle pour la DREAL sont d'un prélèvement par an, mais SME en réalise au moins un par mois.

2.4.5.2. Le personnel

Le travail en zone amiante est réglementé avec un maximum 6h/jour et dans tous les cas pas plus de 2h30 de port de masque (adduction d'air) en continu.

Les salariés passent une visite médicale biannuelle et les fiches d'exposition des salariés sont archivées sur le site puis produites au médecin du travail lors des visites médicales.

Il est encore intéressant de noter ici que la DREAL n'est pas destinataire de ces fiches car ce type de contrôle ne relève pas de ses missions.

2.4.5.3. Les déchets

Les déchets sont triés en **14 catégories ce qui entraîne la nécessité de disposer de 14 Certificats d'Acceptation Préalable** : grenaille amiantée, sable amianté, EPI contaminés par des substances dangereuses, etc.

Dans le cadre du stockage en Installation de Stockage de Déchets Dangereux, c'est SME qui reste responsable du déchet car la société est le producteur du déchet amianté. Contractuellement, la SNCF se défaisant d'un matériel roulant qui n'est pas considéré comme étant un déchet.

Il est à noter que sur le plan réglementaire, les effluents sont soumis à un seuil maximum de 30 mg /l pour les matières en suspension afin de pouvoir être rejetés... En revanche, il n'existe aucun contrôle sur la quantité éventuelle de fibres contenues dans les effluents.

Cet état de fait est une traduction des conséquences de l'absence de rubrique ICPE concernant spécifiquement l'activité de désamiantage sur site dédié.

Compte tenu des procédés de désamiantage mis en œuvre, la production de déchets correspondant à des associations de matériaux contenant de l'amiante avec des matériaux qui en sont à l'origine dépourvus (produit de sablage, etc) dans des quantités importantes. Cela pose la question de la pertinence dans certains cas du désamiantage de certains éléments par rapport à leur traitement direct comme déchet amianté (équipements métalliques par exemple).

La réglementation applicable aux opérations de désamiantage est éclatée : prescriptions du Code de l'environnement / prescriptions du Code du Travail de la Santé. Il en résulte actuellement des situations d'incohérence juridique qui posent question en matière de maîtrise des impacts sur l'homme et l'environnement des opérations de désamiantage.

2.4.6. Développement de la filière

Le volume de matériel roulant en attente de désamiantage sur l'ensemble du territoire national est aujourd'hui supérieur aux capacités des acteurs présents sur le recyclage.

SME estime qu'il y a un marché pour 5 acteurs nationaux ayant une capacité équivalente. Ces acteurs devraient être répartis sur le territoire de façon à limiter les transports éloignés qui se font par camions.

Actuellement, l'entreprise ONET procède à du désamiantage au Mans sur une installation située sur un site fourni par la SNCF et selon un procédé d'hydro décapage.

L'entreprise BARTIN met en œuvre également une installation près de Troyes suite au marché conclu avec la RATP et concernant le désamiantage de 300 voitures selon un procédé d'hydro décapage. Enfin, GEODIS doit ouvrir un site à CULMONT CHALINDREY (52) qui devrait traiter 200 matériels par an ; le type d'installation et le procédé ne sont pas connus.

La mise en place de ce type d'installation nécessite des investissements lourds et malheureusement, pour des questions de coûts, les donneurs d'ordre potentiels ne sont pas aptes à donner aujourd'hui de la visibilité aux acteurs du marché.

2.4.7. Focus sur le désamiantage des pièces métalliques

Le grenillage est utilisé essentiellement pour la dépollution de pièces métalliques. Il est à noter que la possibilité d'introduire directement des pièces métalliques amiantées dans le four des aciéries a été envisagée au sein de la profession des aciéristes et affineurs.

Selon le responsable des recherches du groupe Arcelor Mittal, (Mr Russo) :

« Le four à arc électrique sidérurgique ne peut pas accepter des pièces métalliques ayant un revêtement amianté, car même si la température de l'arc électrique est de plusieurs milliers de degrés, cet arc n'est pas stable : il est intermittent et la température dans le four n'est pas homogène, surtout en début de fusion. Tous ces phénomènes font qu'il règne dans le four électrique des courants de fumées assez violents captés au mieux et dans lesquels vont se retrouver les fines particules

d'amiante. Ces fumées sont traitées par passage dans une chambre de post combustion où entrent en action des brûleurs oxydants qui ont pour mission de dégrader les molécules organiques « lourdes » qui peuvent sortir du four (ce qui prouve bien que la température des fumées qui sortent n'est pas celle de l'arc électrique) mais cette étape sera sans effet sur l'amiante. Les fumées sont ensuite refroidies et dépoussiérées dans des filtres à manches. Les poussières ainsi récupérées sont acheminées chez un sous-traitant qui en extrait le zinc et peut-être d'autres éléments par pyrométallurgie. Si ce sous-traitant trouvait de l'amiante dans les poussières il ne pourrait pas les retraiter et la législation imposerait des contraintes de stockage et de transport de ces poussières très sévères, sans parler des risques d'exposition pour les opérateurs des fours à arc et pour tous ceux qui ont en charge la gestion des poussières.

Pour l'ensemble de ces raisons, le four électrique ne peut pas accepter des pièces amiantées dans sa charge de ferraille.

En ce qui concerne l'utilisation de ferrailles dans les convertisseurs (autre « four d'aciérie ») la température des ferrailles chargées est suffisante pour brûler les éventuels revêtements organiques pouvant se trouver sur les ferrailles mais insuffisante pour dégrader l'amiante qui, à nouveau, va se retrouver dans les poussières du convertisseur, poussières qui sont ensuite valorisées, donc l'affineur se retrouve dans une problématique identique à celle précédemment exposée. »

Toujours selon Arcelor Mittal, il vaut mieux **s'orienter vers des systèmes abrasifs sous vide** pour arracher les revêtements amiantés et les traiter à part. Les pièces, une fois désamiantées, pourront alors être fondues dans un four électrique ou un convertisseur, sous réserve d'apporter la preuve que le désamiantage a bien été réalisé à 100%.

Il est à noter que cette technologie est celle employée au sein de la société SME et également dans le cadre des opérations préalables au traitement d'inertage chez Inertam.

Cette analyse est totalement partagée par des acteurs de la démolition qui « réservent » leurs ferrailles et autres pièces métalliques amiantées à un traitement de type Inertam, après grenailage. C'est en particulier la position du responsable déchets amiantés de la société Serpol.

En l'état actuel des technologies, il n'apparaît pas envisageable de traiter les pièces métalliques amiantées directement dans les fours d'aciéries pour procéder à leur valorisation matière.

Dans un contexte de renforcement de la maîtrise des risques lié aux opérations de désamiantage sur la santé, la mise en œuvre de travaux de recherche et développement d'une filière de valorisation des pièces métalliques amiantés apparaît pertinente.

En outre, compte tenu des coûts des opérations de désamiantage pour les maîtres d'ouvrage, le développement d'une telle filière est également un enjeu économique important.

2.5. Opération de déconstruction d'un site tertiaire complexe : siège du Crédit Agricole de Nantes

Le chantier de déconstruction du siège du Crédit Agricole de Nantes a servi de support pour les investigations de terrain menées dans le cadre de l'analyse des procédures de déconstruction totale de sites tertiaires complexes.

Ce chantier récent (2014 - 2015) a été analysé en s'appuyant sur des interviews des prestataires de désamiantage et déconstruction qui ont réalisés le chantier : la société OCCAMIANTE et la société OCCAMAT Démolition toutes deux membres du Groupe EPC. Le chantier a duré 6 mois.



Figure 38 Vue d'ensemble du site du Crédit Agricole (Source : OCCAMAT)

2.5.1. Caractéristiques des ouvrages déconstruits

Le site du siège du Crédit Agricole d'une surface totale de 15 000 m² supportait des bâtiments de bureaux de type R+4 correspondant environ à 11 500 m² construits.

La structure des bâtiments est de type poteaux poutres béton avec façades rideaux métalliques et vitrées rapportées.

Le bâtiment est situé en zone urbaine dans un environnement pavillonnaire.



Figure 39 Détail d'une façade (Source : OCCAMAT)



Figure 40 Détail d'un joint structure métallique de façade / surface vitrée (Source : OCCAMAT)

2.5.2. Diagnostic amiante

Le diagnostic amiante a mis en évidence la présence de **joints amiantés dans les tous les éléments des façades vitrés** :

- Entre la structure béton et les profilés métalliques,
- Entre les profilés métalliques et les vitrages.

2.5.3. Diagnostic déchets préalable

Lors des estimations des quantités de déchets de verre à valoriser la distinction n'avait pas été faite entre le verre fumé et le verre blanc ; or, le verre fumé (teinté dans la masse) n'a pu être valorisé et a été traité en installation de stockage de déchets non dangereux.

De l'avis d'OCCAMAT Démolition, **le diagnostic préalable tel qu'il est conçu et réalisé actuellement ne permet pas la définition de procédures de désamiantage et déconstruction efficaces et des interfaces entre elles lors du chantier.**

Dans la réponse à un appel d'offre tel que celui du siège du Crédit Agricole, le SOGED (Schéma d'Organisation et de Gestion des Déchets) établi par l'entreprise sert de pièce contractuelle pour apprécier les écarts entre le diagnostic déchets préalable et le formulaire de récolement.

Or, dans le contexte actuel de non qualité des diagnostics déchets préalables, et de renforcement des prescriptions en matière d'émission de fibres, il convient de bien appréhender la place accordée au diagnostic dans l'analyse de la pertinence des offres des entreprises : **le risque étant de favoriser des offres proches du diagnostic par mauvaise appréhension des possibilités de séparation des matériaux amiantés de leurs supports.**

Les efforts conduits par les maîtres d'ouvrage pour améliorer la qualité des diagnostics amiante doivent maintenant concerner également le diagnostic préalable déchets afin de favoriser la mise en œuvre de procédures de désamiantage moins génératrices de déchets amiantés liés aux ouvrages et aux mesures de confinement et protection.

2.5.4. Apports des caractéristiques des marchés de travaux à l'optimisation des quantités de déchets amiantés produites

Le marché de travaux regroupait les opérations de désamiantage et de déconstruction des ouvrages.

Les entreprises répondaient en groupement même si les opérations de désamiantage et déconstruction correspondaient à deux phases de chantier distinctes.

Une telle procédure sur un chantier de déconstruction de bâtiments tertiaires est propice à une limitation des quantités de déchets amiantés produites.

En effet, dans cette configuration lors du chantier du siège du Crédit Agricole les entreprises OCCAMIANTE et OCCAMAT Démolition ont pu mettre en œuvre **une procédure de précurage en amont des opérations classiques désamiantage – curage – déconstruction** :

- ✓ l'entreprise de déconstruction réalise un pré-curage des bâtiments qui facilite l'intervention ultérieure du désamianteur ; à titre d'exemple, dans le cas d'un pied de cloison en contact avec un sol recouvert de colle amiantée, le déconstructeur va découper la cloison à mi hauteur et prendre en charge les déchets matériaux correspondant au haut de la cloison. La procédure de pré-curage prévoit également le maintien d'ouvrages de second œuvre qui peuvent faciliter le confinement afin de limiter les volumes de bâtiments à confiner.
- ✓ le désamianteur intervient ; dans cet exemple, il prend en charge des déchets liés au retrait de la colle amiantés et du pied de cloison seulement restant.
- ✓ le déconstructeur achève la déconstruction des ouvrages.

La mise en œuvre d'une procédure de pré curage nécessite un dialogue entre les intervenants des deux phases désamiantage / déconstruction.

En déconstruction d'ouvrages tertiaires, un groupement solidaire des entreprises de désamiantage et de déconstruction est obligatoire pour réduire les quantités de déchets amiantés produites et rationaliser les confinements nécessaires au désamiantage.

En déconstruction de sites industriels, l'approche est nécessairement différente (cf. retours d'expériences centrales thermiques EDF).

Or les sites industriels comportent également des bâtiments tertiaires, il serait par conséquent opportun de dissocier les deux typologies de chantiers de désamiantage/déconstruction sur les sites industriels pour limiter les quantités globales de déchets amiantés produites (déchets liés aux ouvrages et déchets de protection des personnels et de l'environnement).

De même, l'attention apportée au zonage du chantier par le roulement qu'il permet entre les opérations de précurage – désamiantage – déconstruction est propice à une diminution des quantités totales de déchets amiantés.

2.5.5. Procédures de déconstruction et de traitement mises en œuvre

Le bilan de l'opération fait apparaître :

- 200 tonnes de plancher technique rapporté
- 370 tonnes de déchets non dangereux en mélange issus du curage des bâtiments
- 300 tonnes de profilés métalliques et vitrages de façades
- 15 000 tonnes de béton de structure
- 265 tonnes de déchets amiantés, hors déchets de matériels de désamiantage et de protection tant de l'environnement que des personnels.

Ce bilan amène plusieurs commentaires :

- Dans un contexte de renforcement de la réglementation sur les émissions de fibres dans l'environnement, **la problématique des tonnages de déchets amiantés non liés aux ouvrages déconstruits est importante.**

En effet, sur une intervention de désamiantage de dalles de sol par exemple le choix qui a été fait de gérer l'intervention en niveau 1 de protection a :

- pour effet vertueux, de limiter au maximum les émissions de fibres et les quantités de déchets produites grâce à des interventions plus méticuleuses,
 - pour inconvénient, d'augmenter les quantités de déchets de matériels de protection amiantés par rapport à une intervention en niveau 2 de protection (envisageable réglementairement pour ce cas d'espèce). A noter que dans certains cas de figure les tonnages de déchets amiantés liés à la protection du chantier sont supérieurs aux tonnages liés aux ouvrages.
- Les joints amiantés entre les châssis métalliques et la structure béton des bâtiments ont été retirés ; en revanche, retirer les joints amiantés entre les profilés métalliques et le verre aurait nécessité compte tenu des prescriptions réglementaires « zéro émission de fibre » une intervention en salle blanche incompatible avec les contraintes d'intervention sur site. En conséquence, le complexe matériau profilés aluminium - joints amiantés - verre a été acheminé en installation de stockage de déchets dangereux.
- Un tri pour valorisation des autres matériaux fibreux type laine de verre aurait pu, le cas échéant, facilement être mis en œuvre sur ce chantier compte tenu du caractère très manuel des opérations de curage des bâtiments. D'ailleurs, une expérimentation de tri dans les étages des déchets de plâtre a été conduite à l'occasion du chantier, OCCAMAT participant au **programme européen Life+ pour le développement de la filière de valorisation des déchets de plâtre**.

Les conséquences des choix des procédés de désamiantage liés à la nouvelle réglementation mériteraient de faire l'objet d'une approche globale de type ACV des impacts des quantités de déchets de matériels de protection produites en regard des impacts des déchets de matériaux de construction amiantés objet de l'opération de désamiantage.

Une telle approche apporterait des éléments de réflexion utiles pour faire évoluer les procédures actuelles de désamiantage en cohérence avec les impératifs de protection des personnes et des milieux.

OCCAMIANTE expérimente actuellement un chiffrage des quantités réelles de déchets amiantés produites sur différents chantiers afin d'apprécier les impacts du choix des procédures de déconstruction sur les quantités de matériels de protection nécessaires. Cette approche vise à faire évoluer ses procédures de désamiantage vers une prévention des quantités de déchets amiantés totales produites et à rationaliser par voie de conséquence les coûts des opérations de désamiantage.

Pour mémoire ces coûts de désamiantage sont proportionnellement très supérieurs aux coûts de traitement des déchets amiantés.

2.5.6. Aspects santé et sécurité spécifiques liés aux procédures de déconstruction mises en œuvre

OCCAMIANTE conduit des actions de R&D sur les modes de désamiantage, comme :

- la **saturation des flocages en eau avant intervention** au lieu de l'utilisation d'un surfactant afin de mieux désolidariser le flocage de son support,
- ou l'utilisation de robots dès que la configuration des espaces à désamianter le permet.

En outre, le croisement des retours d'expérience conduisent OCCAMIANTE et OCCAMAT à adopter des mesures de précaution vis à vis des personnels et des milieux tels que :

- **La ventilation assistée** : même si elle n'est pas obligatoire, elle est systématiquement mise en œuvre lors des opérations de **challumage** pour les personnels d'OCCAMAT Démolition en regard des risques d'inhalation de vapeurs toxiques ; elle constitue de fait aussi une protection supplémentaire en cas de découverte inopinée d'amiante en cours de chantier.
- Les **unités de filtration des eaux de procédé de désamiantage sont filtrées sur des unités similaires à celles requises par la réglementation pour les douches des personnels.**

2.6. Autre opération de déconstruction totale d'un site tertiaire : bâtiment usuel de bureaux

2.6.1. Caractéristiques des ouvrages déconstruits

Le chantier de déconstruction a été réalisé sur un bâtiment à usage de bureaux appartenant à la société SERPOLLET, situé en région lyonnaise. Cet ouvrage avait pour vocation d'être totalement déconstruit en vue d'une nouvelle construction.

Ce chantier récent date du printemps 2015 et a été réalisé par une filiale du Groupe, la société SERPOL, sous le contrôle de son responsable des opérations de désamiantage.

Le bâtiment est un immeuble de 3 étages avec une toiture terrasse recouverte de graviers. Les revêtements des plafonds sont à base de plâtre et de baguettes de bois et les vitrages sont métalliques.



Figure 41 Le chantier de déconstruction réalisé par SERPOL (Source : SERPOL)

En matière d'organisation de la déconstruction, et en particulier de retrait des matériaux fibreux, les caractéristiques suivantes des ouvrages et équipements :

- hauteurs moyennes,
- état de conservation parfois dégradé,
- taux d'occupation faible des différents planchers des bâtiments,
- circulation par escalier intérieur

induisent :

- ✓ un travail manuel dans des espaces relativement faciles d'accès pour les opérateurs,
- ✓ des espaces d'entreposage des déchets issus du désamiantage et du curage faciles d'accès, permettant un stockage aisé des déchets,
- ✓ le recours à des contenants de pré-collecte des déchets de faibles dimensions type big bag d'un mètre cube pour acheminer les déchets de leur lieu de production à leur lieu de regroupement sur le site avant enlèvement pour acheminement vers leur lieu de traitement.

2.6.2. Chronologie du chantier de déconstruction

Le chantier de déconstruction s'est étendu sur plusieurs semaines correspondant au déroulé des phases suivantes :

- opérations de curage des bâtiments pendant 3 semaines.
- opérations de désamiantage des divers locaux pendant 2,5 semaines



Figure 42 Zone curée prête pour les opérations de désamiantage (Source : SERPOL)

Les opérations de désamiantage ont lieu très majoritairement (en termes de volumes de déchets produits) après la phase spécifique de curage et sont complétées par des opérations de désamiantage complémentaires pouvant intervenir lors de découvertes au cours des opérations ultérieures de déconstruction.

En conséquence, une massification des flux de déchets contenant de l'amiante existe de fait et peut constituer un atout pour la mise en œuvre de procédés de prétraitement ou traitement mobiles sur site.

2.6.3. Diagnostic amiante

La localisation des matériaux contenant de l'amiante a été classiquement réalisée, comme le prescrit la réglementation, par analyse de plans et descriptifs retraçant l'historique de la construction et des interventions d'extension et de réhabilitation successives en cours d'exploitation des équipements et ouvrages. La visite des locaux a permis de valider les informations issues de l'étude des éléments descriptifs.

Cette localisation est vérifiée au cours des travaux de curage et ce qui permet de retrouver des éléments amiantés hors de ceux qui apparaissaient dans le bilan initial.

2.6.4. Diagnostic déchets préalable

Il n'y a pas eu de diagnostic déchets préalable ou du moins l'entreprise intervenant dans les opérations de désamiantage n'en a pas eu connaissance.

2.6.5. Caractéristiques des marchés de maîtrise d'œuvre et de travaux

La maîtrise d'œuvre du chantier est assurée par le promoteur immobilier qui intervient sur cette opération et elle est déléguée au responsable du Groupe Serpol.

2.6.6. Intervenants du chantier

Les marchés de travaux relatifs aux opérations de désamiantage et de déconstruction ne sont pas distincts car ils sont gérés par les mêmes entités du Groupe SERPOL.

En effet, le Groupe SERPOL possède, en interne, l'ensemble des compétences nécessaires pour effectuer à la fois le curage et le désamiantage des bâtiments, puis la déconstruction de l'ouvrage complet en vue des opérations de reconstruction d'un bâtiment neuf.

Une séparation des marchés ne semble être ni un atout ni une contrainte pour la mise en œuvre de nouveaux procédés de traitement de l'amiante, notamment lorsque l'intervenant possède les compétences globales.

2.6.7. Procédures de déconstruction et de traitement

La plupart des zones amiantées ont été localisées au niveau :

- des nez de marches (colle),
- des dalles de sol (colle),
- des conduits en amiante-ciment,
- de la chaudière.

L'enlèvement des colles a été réalisé avec aspiration à la source.
Les conduits en amiante-ciment ont été déconstruits.
La chaudière a été démontée.

Les outils utilisés sont des rectifieuses, des burineurs, des ponceuses.

Au cours des opérations de curage, de nouvelles zones suspectes ont été localisées :

- seconde couche de faïence derrière une première couche,
- papier d'étanchéité recouvert d'une couche de peinture bitumineuse, derrière une plaque de Placoplatre,
- nouveaux conduits en amiante-ciment.



Figure 44 Double couche de faïence
(Source : SERPOL)



Figure 43 Revêtement bitumineux (Source : SERPOL)

Les opérations ont été réalisées en niveau 2, sous confinement simple peau avec une bâche thermo soudée mise en dépression et secourue avec un groupe électrogène et des extracteurs.

Les déchets sont sous conditionnés en double sac amiante et en big-bag, à l'exception des conduits de fumées et de la chaudière qui sont conditionnés sur palette filmée et étiquetée amiante.



Figure 45 Isolement avec bâche thermo soudée (Source : SERPOL)

La séparation des parties amiantées est privilégiée mais dans certains cas celle-ci n'est pas applicable d'un point de vue économique et sanitaire, comme dans le cas de la chaudière, des conduits de cheminée et des nez de marche qui sont traités avec leurs baguettes de collage.

Pour la chaudière, le choix est lié au tarif de traitement car celui-ci est fixé par rapport au volume à traiter et le fait d'enlever la carcasse métallique diminue le poids mais pas le volume.

En revanche, si la durée des opérations est supérieure dans le cas où une séparation des autres matériaux est réalisée, les coûts de traitement sont diminués car les volumes sont plus faibles.

Dans certains cas, les supports des matériaux amiantés sont conservés afin d'éviter des opérations de grattage complexes et risquées.

Le choix des procédures de désamiantage est lié essentiellement au risque encouru et à l'économie qui sera réalisée ou non lors du traitement.

Chaque décision est prise en fonction du type d'équipement à désamianter et de son environnement.

Mais la part du coût des opérations désamiantage représenté par le traitement des déchets est faible.

2.7. Pont d'actualité sur projet DEMOCLES

Depuis septembre 2014, RECYLUM, (éco-organisme dédié à la collecte et au traitement des lampes et de certains déchets électriques des bâtiments : alarmes, détecteurs, éléments de mesure et contrôle,...) a initié le projet « DEMOCLES, les Clés de la Démolition Durable » avec le soutien de l'ADEME et la participation de nombreux acteurs concernés par la problématique de gestion des déchets issus des activités de démolition et de réhabilitation des bâtiments.

L'objectif de DEMOCLES est, à travers notamment des chantiers tests, de faire le point sur les problèmes liés à la démolition et au recyclage des déchets du second œuvre du bâtiment et de promouvoir des idées innovantes dans ce domaine ainsi que de définir un cadre commun et opérationnel de dépose sélective d'éléments de second œuvre (hors plomb et amiante) pour une mise en filière appropriée.

Selon les intervenants du projet et selon l'ADEME qui soutient DEMOCLES, **moins de 50% des déchets du bâtiment sont recyclés actuellement en France, alors que l'obligation légale provenant de la réglementation européenne est de 70% ; cela provient essentiellement du fait que seuls les déchets de démolition tels que gravats sont recyclés et que les déchets considérés comme provenant du second œuvre, à l'exception du plomb et de l'amiante sont peu recyclés.**

L'ADEME estime à 10 millions de tonnes la quantité de ces déchets et partant de ce constat, un certain nombre de prestataires provenant des acteurs du bâtiment se sont regroupés afin de viser la prise en compte réelle des déchets du second œuvre au travers de 10 chantiers pilotes en France.

Sur les 10 millions de tonnes de déchets du second œuvre, les déchets dangereux représentent environ 2.4%, soit 200.000 tonnes/an et ceux-ci doivent être considérés dès le départ du chantier afin d'éviter de les mélanger avec des déchets recyclables, ce qui automatiquement aurait pour conséquence de freiner l'atteinte des taux de valorisation.

Dans cette optique, selon les partenaires de l'étude, il est primordial d'établir un dialogue concret en constructif entre acteurs en élaborant un « langage commun » permettant à l'ensemble des corps de métier d'avoir une identique compréhension des problèmes.

Un des points principaux qui ressort de ce travail concerne les exigences en termes de dépose sélective qui s'applique aussi bien aux déchets dangereux que non dangereux :

- Déchets dangereux : éviter de les mélanger avec des déchets recyclables afin de ne pas avoir d'impact négatif sur le taux final de valorisation et d'éviter les risques sanitaires lors des opérations de déconstruction,
- Déchets non dangereux : mieux ils sont triés dès le départ plus le taux de recyclage sera élevé.

La réalisation de 10 chantiers expérimentaux doit permettre d'établir des règles applicables par la suite à l'ensemble des opérations de déconstruction de bâtiments et de mettre en place des formations et des recommandations à l'usage des maîtres d'œuvre/ouvrage.

A ce jour, sur les dix chantiers envisagés en Ile de France et dans la région Rhône/Alpes, 5 ont été traités et 3 sont en cours.

2.8. Eléments de compréhension de la problématique granulats amiantes de Travaux Publics

2.8.1. Constats

Depuis quelques temps, surviennent des arrêts de chantiers et fermetures de carrières du fait de la présence d'amiante dans les granulats issus d'opérations de rénovation ou de démolition de chaussées.

A titre d'illustration, en 2014 :

- ✓ **Fermeture de la carrière de la Meilleraie en date du 02/10/2014** suite à des analyses qui ont révélé des traces d'amiante, même si la préfecture de Vendée a rendu un communiqué qui se voulait rassurant. En effet, selon l'administration, les poussières d'amiante détectées dans la carrière de La Meillerie-Tillay seraient sans danger aux abords immédiats du site et il n'y aurait « *pas de risque pour les riverains au regard des standards du code de la santé publique* ». Cependant, la direction a pris la décision de suspendre l'activité pour des raisons sanitaires, notamment sur un poste de travail le plus exposé au risque. Des analyses complémentaires sont en cours et les salariés devraient être affectés sur d'autres sites. L'industrie des carrières qui basait ses actions amiante sur le Règlement Général des Industries Extractives est maintenant soumise, depuis l'abrogation de cette réglementation (16/07/2014) au Code du Travail et de la Santé.
- ✓ **Arrêt des travaux sur le chantier du projet Transport Est-Ouest (TEO) à Saint Brieuc :**
Extrait de l'article paru dans la presse (Moniteur) le 28/03/2014 : « *A Saint-Brieuc, le chantier de la première tranche du chantier TEO avait bien commencé. En novembre 2013, premiers coups de pioche pour cette ligne de 8 km (investissement : 51 millions d'euros). Mais, anticipant une réglementation sur les risques d'exposition à l'amiante, la Carsat des Côtes-d'Armor exige que les morceaux de chaussée retirés soient stockés dans des centres pour déchets dangereux. Soit un surcoût conséquent de l'ordre de 4M€* ». *Il s'agit d'actinolite (amiante naturel) et suite aux exigences de la Carsat, les déchets provenant du rabotage ont commencé à être mis en big-bag et envoyés en centre de stockage de Classe II. Mais la DREAL a exigé le stockage en unité de déchets dangereux avec un surcoût de 600k€ soit 15% de surcoût. Il semble que les donneurs d'ordre ont pris au sérieux ces exigences notamment en envisageant une première étape prenant*

en compte le diagnostic, non obligatoire auparavant. Le BRGM commence à dresser une cartographie des matériaux avec des traces d'amiante naturel et certaines collectivités, comme Cherbourg ou le conseil général de Loire-Atlantique, font désormais réaliser un diagnostic amiante avant chaque chantier tout en se lançant dans une cartographie de leur réseau, comme Rennes qui vient d'attribuer un marché de 100 prélèvements à un bureau d'analyses et contrôles. Ces collectivités partent du principe qu'il s'agit avant tout d'un problème de santé du personnel incontournable et devant dorénavant être géré par les professionnels du BTP. »

Ces deux cas illustrent de façon assez claire l'émergence de ce nouveau problème qu'il sera difficile, à l'avenir de ne pas considérer avant tout démarrage de chantier.

2.8.2. Aspects réglementaires

D'un point de vue réglementaire, le secteur des travaux publics prenait en compte les prescriptions du Décret 2012-639 du 4 mai 2012 qui a étendu aux opérations de voirie les obligations de gestion des risques sanitaires liés à l'amiante.

Ce décret visait essentiellement les enrobés renforcés par des fibres de type Chrysotile entre 1970 et 1995.

Cependant, l'incorporation dans les chaussées plus récentes de granulats recyclés pouvant potentiellement contenir de l'amiante peut conduire à considérer toute chaussée comme un chantier à risques amiante.

Ce décret a conduit le Ministère de l'Ecologie à publier une Circulaire en date du 15/05/2013 qui donne des instructions opérationnelles telles que :

- ✓ Cartographie des zones ayant utilisé des enrobés renforcés entre 1970 et 1995 sur l'ensemble du réseau national,
- ✓ Modalités d'intervention sur ces zones lors de travaux ou démolition,
- ✓ Gestion des déchets provenant des chantiers,
- ✓ Information du personnel intervenant sur ces zones.

Un guide technique et méthodologique a été publié dans la foulée par les organismes publics et des syndicats professionnels, à l'intention des maîtres d'ouvrage pour encadrer les interventions sur voirie ou autres réseaux.

L'industrie des carrières qui basait ses actions amiante sur le Règlement Général des Industries Extractives est maintenant soumise, depuis l'abrogation de cette réglementation (16/07/2014) au Code du Travail et de la Santé.

• Décret n°2012-639 du 4 mai 2012 entré en vigueur au 1^{er} juillet 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante

- Objet : protection des travailleurs contre les risques d'exposition à l'amiante
- Publics concernés : employeurs et travailleurs qui réalisent des travaux de retrait ou d'encapsulage de matériaux contenant de l'amiante ou qui effectuent des interventions sur des matériaux susceptibles de provoquer l'émission de fibres d'amiante.

Axes de la réforme :

- Abaissement de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) de 100 fibres (fibres OMS/MOPC) par litre à 10 fibres (OMS + FFA/META) par litre sur 8h au 1^{er} juillet 2015 ;

- Contrôle de l'empoussièrement en milieu professionnel selon la méthode META,
- 3 niveaux d'empoussièrement qui conditionnent les règles techniques, les moyens de protection collective et les équipements de protection individuelle à mettre en œuvre : niveau 1 \leq 100 f/L, niveau 2 \leq 6 000 f/L, niveau 3 \leq 25 000 f/L, $>$ 25 000 f/L (absence d'APR adaptés selon les FPA actuels)
- Suppression de la dualité de notion friable/non friable
- Généralisation de la certification à l'ensemble des activités visées à la sous-section 3
- Fixation des conditions d'utilisation, d'entretien et de vérification des moyens de protection collective (MPC) et équipements de protection individuelle (EPI), en particulier des APR adaptés aux niveaux d'empoussièrement sur les chantiers.

Les règles du code du travail applicables aux travaux exposant à l'amiante comportent trois volets :

- En Sous-section 2, des dispositions communes à toutes les opérations comportant des risques d'exposition à l'amiante ;
- En Sous-section 3, des dispositions spécifiques aux travaux d'encapsulation et de retrait d'amiante ou d'articles en contenant ; (Exemple : travaux de rabotage de couches amiantées).
- En Sous-section 4, des dispositions particulières aux interventions sur des matériaux ou appareils susceptibles de provoquer l'émission de fibres d'amiante. (Exemples : carottage, préparation de surface pour réparation de nids de poule, pontage de fissures, balayage mécanique, battage de glissière).

(Source : INRS, AMIANTE – Protection des travailleurs, juillet 2015)

Des arrêtés complètent ces dispositions réglementaires en matière de formation des travailleurs exposés à l'amiante, de protection collective et individuelle, de certification des entreprises chargées des travaux d'encapsulation et de retrait et d'accréditation des laboratoires réalisant les contrôles des niveaux d'empoussièrement en vue de la vérification du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP). *(Source : INRS, AMIANTE – Protection des travailleurs, juillet 2015)*

La Circulaire du 15 mai 2013 portant instruction sur la gestion des risques sanitaires liés à l'amiante dans le cas de travaux sur les enrobés amiantés du réseau national non concédé décrit les stratégies d'intervention sur les revêtements routiers amiantés.

Le Décret n°2012-639 du 4 mai 2012 a été modifié par le décret n°2013-594 du 5 juillet 2013 :

Sont concernés :

- Les entreprises réalisant des travaux de retrait ou d'encapsulation de matériaux contenant de l'amiante et des interventions sur des matériaux susceptibles de provoquer l'émission de fibres d'amiante.
- Les organismes certificateurs
- Les organismes accrédités pour procéder aux mesurages d'empoussièrement et au contrôle de la valeur limite d'exposition professionnelle.

Modifications :

Ce décret a modifié le délai de mise en conformité avec l'obligation de certification et l'obligation d'accréditation prévues par la réglementation en matière de protection des travailleurs contre des risques d'exposition à l'amiante.

Il a reporté :

- Au 1^{er} janvier 2014 (au lieu du 1^{er} juillet 2013), l'obligation de certification, selon le nouveau référentiel, des entreprises intervenant dans le domaine du retrait et de l'encapsulation de l'amiante,
- Au 1^{er} juillet 2014, l'obligation de certification des entreprises effectuant le retrait de l'enveloppe extérieure des bâtiments (sous réserve qu'elles aient déposé leur demande de certification auprès d'un organisme certificateur avant le 31 décembre 2013),
- Au 1^{er} janvier 2014 (au lieu du 1^{er} juillet 2013), l'obligation d'accréditation, pour l'ensemble du processus d'analyse, des organismes effectuant les mesures de l'empoussièremement et la valeur limite professionnelle.

Le Décret n°2012-639 du 4 mai 2012 a aussi été modifié par le décret n°2015-789 du 29 juin 2015 publié au Journal Officiel le 1^{er} juillet 2015.

Les trois niveaux d'empoussièremement à l'amiante, dont dépendent les équipements de protection individuelle que doivent porter les salariés, sont maintenus pendant six mois. Ils auraient dû mécaniquement être divisés par 10 du fait de l'abaissement, au 1^{er} juillet 2015, de la VLEP de 100 fibres/L à 10 fibres/L.

Cependant, les pouvoirs publics attendent, pour modifier ces trois seuils, les résultats d'une étude sur l'efficacité des appareils de protection respiratoire, attendus en décembre 2015. Les trois niveaux d'empoussièremement à l'amiante respectivement de 100 f/L, 6 000 f/L et 25 000 f/L sont donc maintenus jusqu'à la fin de l'année 2015.

Après quoi, la réglementation évoluera à nouveau avec la fixation de trois nouveaux seuils, en tenant compte d'une VLEP à 10 f/L et de la réévaluation de la puissance des appareils de protection respiratoire.

Pour résumer les implications de ces nouvelles réglementations, les maîtres d'ouvrage doivent dorénavant s'assurer que les interventions suivent bien une organisation basée sur 3 phases :

- Diagnostic et repérage avant travaux,
- Réalisation du chantier suite diagnostic,
- Gestion des déchets issus du chantier.

De plus, en fonction des interventions, la gestion du personnel peut varier :

- Sciage et ouverture de tranchées : formation exigée pour les intervenants,
- Démolition, déconstruction, rabotage : formation du personnel et obligation pour les prestataires d'être certifiés.

2.8.3. Etat actuel des réflexions liés à la problématique « travaux de voirie et actinolite »

Jusqu'au début des années 1990, l'amiante (surtout du chrysotile) a été volontairement ajouté, en faible quantité (jusqu'à 1 % de la masse sèche), dans les enrobés routiers afin d'améliorer la résistance à la fatigue des couches de roulement. C'est cette pratique qui a conduit à la publication d'une circulaire ministérielle en mai 2013 sur la gestion de la problématique amiante dans les enrobés routiers. (Source : Eurofins, *Hygiène du Bâtiment – Analyses d'amiante dans les enrobés routiers*)

À l'occasion de la caractérisation des chaussées et de la vérification de la présence ou de l'absence d'amiante volontairement ajouté (chrysotile), les analyses de laboratoires ont démontré que les granulats des enrobés routiers pouvaient contenir aussi de l'amiante naturellement présent. Dans certaines carrières de régions amiantifères, le granulat peut contenir des matériaux fibreux de la famille des amiantes, en général de type trémolite-actinolite.

➤ **Deux actinolites**

- L'actinolite amiante, dite asbestiforme, qui correspond à un faciès géologique particulier : on parle de faciès asbestiforme associé à une croissance cristalline naturelle unidirectionnelle qui confère à la fibre une souplesse et une résistance à la traction remarquables. Cette croissance ne peut avoir lieu que dans des contextes géologiques bien particuliers.
- L'actinolite non amiante, dont des fragments peuvent avoir une morphologie fibreuse (au sens de la norme NFX 43-050) sans pour autant être qualifiables d'asbestiformes. Les processus d'extraction et de transformation des granulats peuvent justement générer une grande quantité de ces fragments, appelés fragments de clivage.

➤ **Une différenciation difficile**

A l'heure actuelle, l'application de la norme NFX 43-050 **ne permet pas de faire la différenciation entre les fibres d'amiante et les fragments de clivage issus du même minéral**. En effet, la désignation de fibre d'amiante, telle que définie dans la norme, répond à l'application des critères morphométriques et non pas à une identification du faciès du minéral.

➤ **Une grande hétérogénéité des enrobés**

Les enrobés sont constitués de plusieurs matériaux et sont par définition hétérogènes. Les taux d'amiante peuvent varier très fortement au sein même de l'enrobé. La fiabilité des résultats d'analyse dépend de la fraction étudiée et des pratiques des laboratoires. La mise en œuvre de procédés de préparation peut limiter la création de fragments de clivage qui seraient assimilables à des fibres d'amiante au sens de la norme.

➤ **Élaboration d'un protocole technique pour l'échantillonnage, le prélèvement, l'analyse et l'identification des fibres d'amiante dans les fragments de roches**

Suite l'impulsion de la Direction Générale du travail - DGT et la Direction Générale de la Prévention des Risques - DGPR, ce protocole vise à obtenir l'homogénéité des pratiques des laboratoires et d'éviter les erreurs sur la caractérisation de l'actinolite. Malgré sa finalisation prévue pour la fin 2014, il n'est pas accessible.

➤ **Saisine de l'ANSES par la DGT sur les risques sanitaires liés à l'exposition à l'actinolite**

Les questions posées à l'Agence d'évaluation des risques sanitaires sont : l'actinolite présente-t-elle un danger ? Si oui, pour quelles formes ? Quels sont les risques sanitaires liés ? Quelles sont les mesures de protection à prendre ? Existe-t-il des méthodes d'analyse de routine permettant distinguer les fibres d'amiante asbestiformes des fragments de clivage des minéraux non asbestiformes ? Si non, comment les distinguer ?

La remise du rapport final de l'ANSES est attendue fin 2015.

La Direction Générale du Travail a publié une note le 12 décembre 2014 sur l'amiante naturel, relative au cadre juridique applicable aux travaux réalisés sur des matériaux du BTP contenant des fibres d'amiante et/ou des fragments de clivage issus de matériaux naturels. Cette note apporte les premiers éléments de réponse sur les travaux réalisés en présence d'amiante naturel ou de fragments de clivage.

La note précise, en particulier que :

- **Les fragments de clivage issus d'actinolite non asbestiforme ne relèvent pas de la réglementation amiante,**
- **Que les notions de sous-section 3 et de sous-section 4 ne sont pas applicables dans ce cas et qu'il n'est pas nécessaire de recourir à des entreprises certifiées, ni d'imposer la formation des travailleurs par un organisme certifié.**

Cette note indique également que la réutilisation des granulats contenant de l'actinolite sur place est possible sous condition de traçabilité.

http://www.travailler-mieux.gouv.fr/IMG/pdf/14906_noteDireccte_12dec2014_actinolite_fragmentsclivage.pdf

2.9. Synthèse de l'analyse des problématiques de désamiantage et déconstruction réalisées en amont des opérations de traitement de déchets de matériaux amiantés

La maîtrise des diagnostics amiante et déchets est un préalable à l'innovation en matière de traitement des déchets amiantés.

Cette maîtrise constitue de surcroît un facteur d'optimisation économique : le coût de traitement des déchets contenant de l'amiante représente une faible part du coût global des opérations de désamiantage des ouvrages et équipements.

Il en résulte actuellement une priorisation des actions de recherche et développement sur les procédés de désamiantage par rapport aux solutions de traitement.

Dans ce cadre, industriels et prestataires mettent en œuvre des actions de capitalisation des retours d'expérience de leurs opérations de désamiantage et déconstruction qui permettent de générer des diagnostics plus précis : cartographie en 3D des ouvrages et équipements contenant de l'amiante, démarche itérative d'identification et de localisation des éléments amiantés d'un équipement,...

La qualité des diagnostics amiante accroît également les possibilités de maîtrise des risques pour la santé des opérateurs de désamiantage et l'environnement.

En matière d'organisation de la déconstruction, et en particulier de retrait des matériaux amiantés, les caractéristiques des ouvrages et équipements induisent très souvent :

- ✓ un travail manuel dans des espaces étroits difficiles d'accès pour les opérateurs,
- ✓ des espaces d'entreposage des déchets issus du désamiantage restreints (voire inexistant) nécessitant une évacuation au fil de l'eau des déchets,
- ✓ le recours à des contenants de pré-collecte des déchets de faibles dimensions type big bag d'un mètre cube pour acheminer les déchets de leur lieu de production à leur lieu de regroupement sur le site, avant enlèvement pour acheminement vers leur lieu de traitement,

- ✓ l'installation de montes charges, ensemble ponts roulants et autres dispositifs de manutention spécifiques pour le chantier.

Conséquence des prescriptions réglementaires en matière d'émission de fibres lors des opérations de désamiantage, le choix du procédé de désamiantage est déterminé avant tout par son efficacité vis-à-vis de la séparation des matériaux amiantés de leur support et ses impacts sur l'environnement de travail : sécurité des opérateurs et limitation de l'empoussièrément.

Les flux de déchets produits correspondent à des associations de matériaux contenant de l'amiante avec des matériaux qui en sont dépourvus (plâtre, métaux,...) compte tenu d'une part, des procédés de désamiantage mis en œuvre, (produit de sablage, etc), d'autre part, des difficultés de désassemblage des matériaux entre eux (flocage sur une paroi en plâtre,...).

Cette approche sécuritaire et les problématiques de séparation des matériaux posent la question de la pertinence dans certains cas du désamiantage d'éléments constitutifs d'équipements ou d'ouvrages par rapport à leur traitement direct comme déchet amianté.

En effet, l'analyse des retours d'expérience conduite dans l'étude montre les limites de la démarche de désamiantage par séparation des matériaux fibreux de leur support : l'objectif de limitation de la consommation des ressources énergétiques et non énergétique est-il atteint lorsque l'on affecte durant des heures des opérateurs au grattage et sablage de pièces métalliques (tuyauteries coudées de chaudières, pièces de moteurs,...) dans un sas de confinement ? Ne vaudrait-il pas mieux pour préserver la santé des opérateurs, diminuer les coûts et limiter les quantités de déchets (résidus de sablage amianté, EPI contaminés, bâches de confinement,...) juste isoler, découper ces éléments métalliques pour les acheminer vers une installation de stockage des déchets ?

Aujourd'hui, des freins technologiques et métrologiques existent pour la valorisation directe de déchets amiantés dans des installations industrielles non dédiées au traitement des déchets (fours d'aciéries par exemple) notamment en raison des difficultés à garantir la suppression du caractère cancérigène des matériaux amiantés au cours du process.

Mais, dans un contexte de renforcement de la maîtrise des risques lié aux opérations de désamiantage sur la santé et l'environnement la mise en œuvre de travaux de recherche et développement d'une filière de valorisation notamment des pièces métalliques amiantés apparaît pertinente.

Les opérations de désamiantage ont lieu très majoritairement (en termes de volumes de déchets produits) lors de la phase spécifique de désamiantage et sont complétées par des opérations de désamiantage complémentaires lors de la déconstruction. Aussi, une massification des flux de déchets contenant de l'amiante existe de fait et peut constituer un atout pour la mise en œuvre de procédés de prétraitement ou traitement mobiles sur site.

Les conséquences en matière de responsabilité du producteur de déchet des choix des procédés de traitement (inertage par torche à plasma ou stockage en installation dédiée) sont prépondérantes par rapport aux conséquences économiques.

Les sites industriels comportent outre des ouvrages et équipements liés au process, des bâtiments tertiaires ; il en résulte deux typologies de chantiers de désamiantage/déconstruction. Afin de limiter les quantités globales de déchets amiantés produites (déchets amiantés liés aux ouvrages ou équipements et déchets de protection des personnels et de l'environnement), il est opportun d'adopter pour chaque typologie une organisation des prestations de désamiantage et déconstruction adaptée :

- Pour des ouvrages tertiaires, un marché de prestation réalisé par un groupement solidaire des entreprises de désamiantage et de déconstruction,

- Pour des ouvrages industriels, des marchés de prestation des opérations de désamiantage et de déconstruction distincts (mais des entreprises de déconstruction en association avec des intervenants qualifiés pour le cas échéant des prestations de désamiantage complémentaires des équipements et ouvrages.

Les conséquences des choix des procédés de désamiantage liés à la nouvelle réglementation mériteraient de faire l'objet d'une approche globale de type ACV des impacts des quantités de déchets de matériels de protection produites en regard des impacts des déchets de matériaux de construction amiantés objet de l'opération de désamiantage.

Une telle analyse apporterait des éléments de réflexion utiles pour faire évoluer les procédures actuelles de désamiantage en cohérence avec les impératifs de protection des personnes et des milieux et de maîtrise budgétaire.

En outre, elle pourrait contribuer à l'évolution de la réglementation applicable aux opérations de désamiantage et déconstruction aujourd'hui éclatée entre les prescriptions du Code de l'environnement, les prescriptions du Code du Travail de la Santé et celles du Code de la Construction et de l'Habitation.

3. Troisième partie :

**Revue critique des procédés de traitement des déchets
amiantifères et de déchets de matériaux FMA en
général**

3.1. Présentation synthétique des voies technologiques de traitement des matériaux fibreux en fin de vie

Ce chapeau technique a pour but d'améliorer la compréhension des processus physico-chimiques mis en jeu lors des différentes méthodes proposées pour inertiser l'amiante.

Dans un premier temps sont rappelées quelques notions de chimie minérale ainsi que les particularités physico-chimiques de l'amiante.

Dans un deuxième temps, après avoir fourni les éléments de compréhension de l'inertage de l'amiante par voie thermique, sont présentés les mécanismes chimiques à la base des brevets répertoriés et étudiés dans le cadre de l'étude et notamment les procédés basés sur :

- Une attaque acide,
- Une attaque basique,
- L'utilisation d'un agent minéralisant.

Dans un troisième temps, sont détaillées les différentes méthodes proposées dans les brevets étudiés et qui permettent d'améliorer le rendement et la cinétique des réactions.

Ces méthodes sont principalement basées d'une part, sur des procédés mécaniques (broyage / malaxage / pressage) et d'autre part, sur l'emploi d'additifs chimiques (agents tensio-actifs / agents complexant des métaux / fondants / catalyseurs).

Un focus est également proposé sur l'utilisation de la sonochimie (ultrasons) et d'ondes électromagnétiques associées aux effets thermiques qui donnent des résultats intéressants en laboratoire.

Dans un quatrième temps, un éclairage particulier est apporté sur la fabrication du ciment afin de montrer en quoi les nombreux brevets proposant de valoriser les déchets amiantés dans cette industrie peuvent apparaître pertinents dans le cadre d'une approche industrielle.

Enfin sont présentées quelques méthodes qui, du fait de leurs contraintes de mise en œuvre à une échelle industrielle, n'ont pas été retenues pour une étude plus détaillée mais qui cependant présentent un réel intérêt théorique : carbonatation minérale, méthode hydrothermale, co-destruction avec des CFC.

3.1.1. Notions de chimie minérale et propriétés physico chimique de l'amiante

3.1.1.1. Définitions et généralités

Silicate hydraté

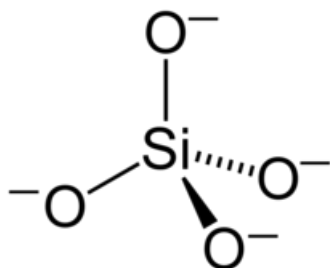


Figure 46 Forme moléculaire du silicate hydraté

Un silicate est un minéral structuré à partir d'une unité de base qui est l'ion silicate $[\text{SiO}_4]^{4-}$. On parle du tétraèdre SiO_4 .

Le tétraèdre SiO_4 est extrêmement stable. Seul l'acide fluorhydrique peut dissoudre le squelette silicique en formant des fluoro-silicates hydrosolubles (SiF_4)










On parle de silicate hydraté lorsqu'au sein d'un ion silicate, certains atomes d'oxygène sont remplacés par des groupes hydroxyle (OH).

Rappel sur les minéraux

La structure moléculaire des minéraux est constituée d'ions. Au sein d'un minéral la charge totale doit rester neutre.

Lorsque le tétraèdre SiO_4 est isolé sa structure est chargée à -4 . Il y a 2 façons de neutraliser les charges : lier ensemble les tétraèdres par leurs atomes d'oxygène (processus de polymérisation tétraèdre à tétraèdre) et/ou se lier avec des ions positifs tels que Fer (Fe), Magnésium (Mg), Sodium (Na), Calcium (Ca).

Notion de « structure idéale »

ANION (-)	CATIONS (+)			
 O^{2-} $R = 1,40$	Si^{4+}  $R = 0,39$	Al^{3+}  $R = 0,51$		
	Fe^{3+}  $R = 0,64$	Fe^{2+}  $R = 0,74$	Mg^{2+}  $R = 0,66$	
	Na^{1+}  $R = 0,97$	Ca^{2+}  $R = 0,99$	K^{1+}  $R = 1,33$	
$R = \text{rayon ionique en Angstroms } (1\text{\AA} = 10^{-9} \text{ mm})$				

Même si chaque composé minéral possède une composition chimique définie, on admet certaines variations dues à la substitution de certains ions par d'autres. Les substitutions d'ions dans les minéraux sont en grande partie contrôlées par la taille et la charge des ions, ce qu'illustre le tableau ci-contre.

Ainsi, il sera facile de faire des substitutions d'ions de taille et de charge semblables, comme de substituer le fer (Fe) au magnésium (Mg), ou le sodium (Na) au calcium (Ca). Le calcium, le sodium et le potassium (K) pourront également se substituer au magnésium sous certaines conditions de température et de pression. En revanche il sera plus difficile de substituer du potassium ou de l'oxygène (O) à l'aluminium (Al).

Figure 47 Tableau comparatif des tailles de cations par rapport à l'anion superoxyde

3.1.1.2. Structure physico-chimique de l'amiante

L'amiante est un terme générique pour décrire une variété naturelle de silicate hydraté contenant du calcium, fer, magnésium, sodium et présentant une structure cristalline fibreuse.

L'amiante est issu de 2 familles de minéraux : Les Amphiboles et les Serpentes.

(NB : toutes les Amphiboles et Serpentes ne sont pas de l'amiante. Au sein de ces familles, seuls les minéraux ayant une structure cristalline fibreuse sont de l'amiante)

On identifie 6 variétés d'amiantes que l'on peut classer ainsi :

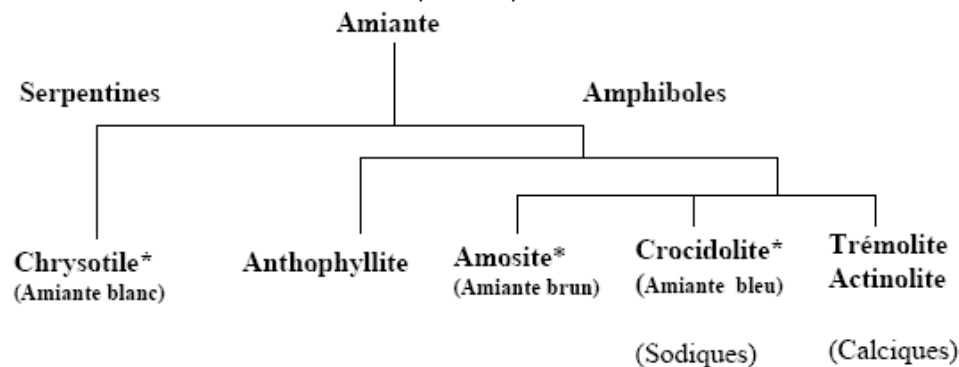


Figure 48 Classement des variétés d'amiante
* variétés d'amiantes d'importance commerciale

Pour la suite de l'exposé, on ne s'intéressera qu'aux variétés d'amiantes d'importance commerciale, seules susceptibles d'être présentes dans un déchet amianté : chrysotile (Serpentine), crocidolite et amosite (Amphiboles).

Polymérisation des ions silicates

Le groupe ionique SiO_4 possède la particularité de pouvoir constituer des polymères en mettant en commun certains atomes d'oxygène (ou groupe hydroxyle).

Les variétés d'amiantes ont toutes une structure cristalline fibreuse. Cependant **cette structure cristalline, qui détermine la forme et la taille des fibres, est un élément de différenciation important entre l'amiante serpentine (le chrysotile) et les amiantes amphiboles. C'est le mode et le degré de polymérisation des ions silicates qui va être à l'origine de ces différences et va expliquer le comportement des différents types d'amiante face aux modes de traitement étudiés.**

Structure cristalline du chrysotile

Le chrysotile est un silicate hydraté essentiellement de magnésium. Les cations Si^{4+} ou Mg^{2+} sont entourés d'anions oxygène (O^-) ou hydroxyle (OH^-).

La structure cristalline du chrysotile se présente comme un polymère formé par la superposition en plusieurs feuillets, d'une couche tétraédrique - Te (tétraèdre SiO_4 associés entre eux) associée à une couche octaédrique - Oc dite brucitique en référence à sa structure et à sa composition qui ressemblent à celles de la brucite, minéral d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) de forme fibreuse. Dans cette couche brucitique de maille $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ deux groupements hydroxyles sur trois sont remplacés par des atomes d'oxygène aux pointes des tétraèdres.

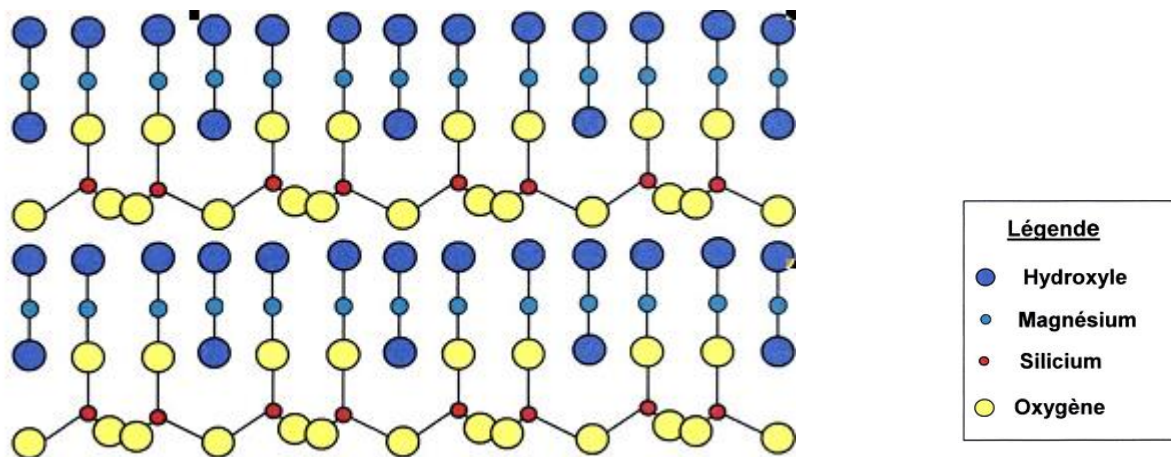


Figure 49 Structure Chimique du chrysotile

En surface du chrysotile, se trouve donc une couche de groupements hydroxyles qui est soutenue par des atomes de magnésium. Une couche de groupements silicates est liée à la couche brucitique par des atomes d'oxygène. Les deux couches forment un feuillet.

Les anomalies de superposition ainsi que les contraintes internes dues à l'asymétrie entre les couches Te et Oc incurvent les couches jusqu'à former des cylindres appelés fibrilles.

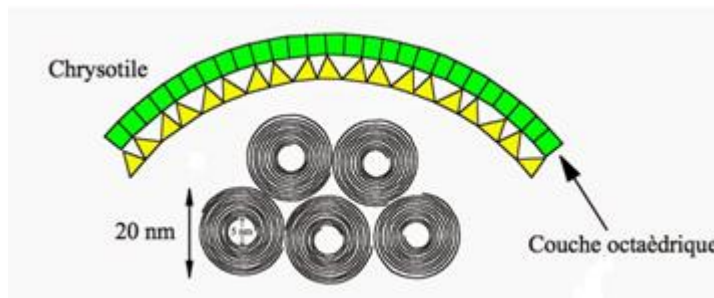


Figure 50 La formation feuillet

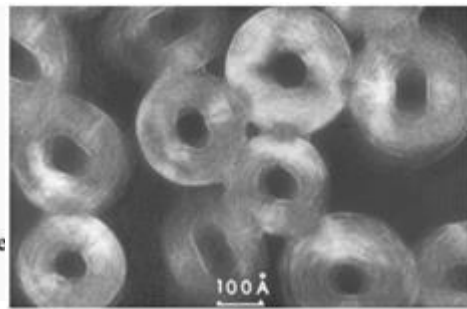


Figure 51 Vue au microscope électronique à transmission, sur une section perpendiculaire à l'axe des fibres

Composition idéale du Chrysotile

Type d'amiante	Composition chimique
Chrysotile	MgO 2SiO ₂ 2H ₂ O

D'après **Kirk** - Othmer / Encyclopedia of Chemical Technology (Vol 3) 3^{ème} édition

A l'état naturel, cette composition chimique peut varier (substitution partielle de Mg par Fe notamment)

Structure cristalline des amphiboles

Les amphiboles sont des silicates hydratés auxquels se lient des cations Fe et Mg (Amosite ou amiante brun) ou Fe et Na (crocidolite – amiante bleu) qui équilibrent la charge.

La structure cristalline des amphiboles se présente comme un polymère en double chaîne linéaire de tétraèdres SiO₄ (certains atomes d'oxygène étant remplacés par des radicaux hydroxyles). Ces chaînes doubles (ou rubans) étant liées entre elles par des cations métalliques (Fe /Mg pour l'amosite ; Fe/Na pour le crocidolite... Ca pour les amphiboles calciques.. etc)

Les positions disponibles pour les ions métalliques se trouvent en périphérie et au sommet de la double chaîne.

Deux groupes hydroxyle sont rattachés au cation central et sont entièrement contenus dans la structure qui est composée d'un empilement de rubans.

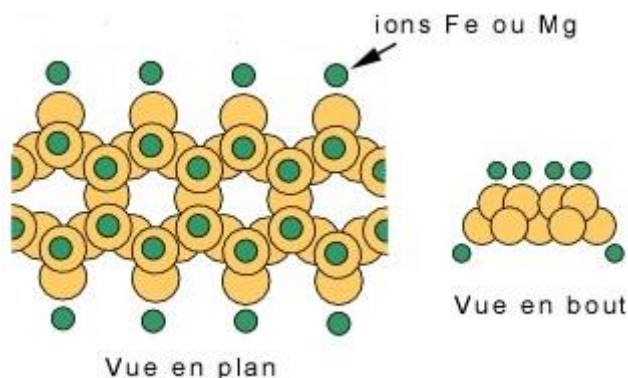


Figure 52 Structure moléculaire des amphiboles

La liaison entre rubans au travers de ces cations métalliques est chimiquement faible et les cristaux montrent facilement un clivage parallèle aux rubans. Contrairement au chrysotile, les amphiboles ne présentent pas une fibrille unique comme unité structurale. Toutes les fibres d'amphibole sont droites et ne présentent pas la courbure typique du chrysotile.

Pour schématiser, les amphiboles présentent une structure moléculaire rigide de forme cylindrique, alors que la structure moléculaire du chrysotile ressemble davantage à une corde flexible faite de petites fibrilles qui peuvent se défaire en plus petites parties.

Composition idéale des Amphiboles

Type d'amiante	Composition chimique
Anthophyllite	7MgO 8SiO ₂ H ₂ O
Amosite*	11FeO 3MgO 16SiO ₂ 2H ₂ O
Crocidolite*	Na ₂ O Fe ₂ O 3FeO 8SiO ₂ H ₂ O
Actinolite	2CaO 4MgO FeO 8SiO ₂ H ₂ O
Tremolite	2CaO 5MgO FeO 8SiO ₂ H ₂ O

* variétés d'amiante d'importance commerciale

Figure 53 Tableau de composition idéale des Amphiboles (Source : Kirk - Othmer / Encyclopedia of Chemical Technology (Vol 3) 3^{ème} édition)

A l'état naturel ces compositions chimiques peuvent varier (substitution Mg / Fe et Na / Ca).

3.1.1.3. Propriétés physico-chimiques des différents types d'amiante

En règle générale, les amiantes sont reconnus pour leur qualités exceptionnelles de :

- Résistance à la chaleur et au feu,
- Faible réactivité chimique (acides et bases),
- Résistance mécanique élevée à la traction et aux frottements (grande flexibilité),
- Imputrescibilité (quasiment non biodégradable à l'échelle de la vie humaine),
- Isolant acoustique,
- Faible conductivité électrique (0,168 W/m/K)*,
- Capacité thermique massique** élevée (1045 J/kg/K),
- Faible densité (Masse volumique de l'amiante en fibres jointes = 1400 kg / m³).

*W = watt ; m = mètre ; K = kelvin ; J = joule ; kg = kilogramme

** Quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin (ou de 1°C) la température d'un kg d'amiante.

Bien qu'on retrouve ces propriétés physico-chimiques communes à tous les types d'amiante, les structures du chrysotile et des amphiboles décrites précédemment ont une incidence sur leurs propriétés de surface et donc sur leur comportement vis-à-vis de certains traitements (par exemple, le chrysotile est beaucoup plus sensible aux attaques acides que les amphiboles)

On pourrait dès lors envisager des procédés de traitement différenciés en fonction de la variété d'amiante en présence... mais ceci reste utopique.

En effet, **ce sont essentiellement la longueur des fibres et leurs qualités (flexibilité / résistance) qui déterminaient les applications de l'amiante.**

Or, les 3 variétés d'amiantes commerciales pouvaient se présenter aussi bien sous forme de fibres courtes que longues et donc être utilisées pour les mêmes applications.

De plus, il est intéressant de noter que le chrysotile a une charge de surface positive. Ceci a notamment conduit les industriels à mélanger le chrysotile avec jusqu'à 40 % d'amphiboles, qui possèdent une charge de surface négative, pour la fabrication de l'amiante-ciment (les amphiboles, après leur interdiction ont été remplacées par des agents tensio-actifs).

Enfin, les déchets amiantés seront la plupart du temps associés à un support ou un liant.
En réalité, **la nature du support ou du liant aura beaucoup plus d'impact sur le choix du mode de traitement que la variété d'amiante.**

Dans le cadre de ce rapport, on parle d'amiante sans faire la plupart du temps de distinctions entre amphiboles et chrysotile. Le principe retenu est qu'il existe systématiquement plusieurs variétés d'amiante en mélange dans les déchets amiantés avec généralement une prédominance du chrysotile puisqu'il représentait avant les interdictions de commercialisation, plus de 90% de la production mondiale d'amiante ; amosite et crocidolite (variétés commerciales d'amiante amphibole) représentant le reste de la production.

3.1.2. Comportement de l'amiante vis-à-vis des différents modes de traitement

Quelques brevets proposent des méthodes de traitement par voie thermique uniquement (fusion ou déshydratation), et quelques autres proposent des méthodes de traitement par voie chimique uniquement (traitement acide à froid).

Cependant, l'essentiel des méthodes de traitement proposées sont basées sur des procédés thermo-chimiques. Elles vont combiner une action chimique permettant de dénaturer la structure cristalline de l'amiante avec un traitement thermique qui par déshydratation ou fusion de l'amiante, va poursuivre et compléter l'altération de la structure cristalline.

Le traitement chimique préliminaire permettra de raccourcir la durée du traitement thermique et/ou d'utiliser des températures de traitement moins importantes (de 90 à 1200°C).

L'idée principale étant alors de pouvoir procéder au volet thermique du traitement dans des installations déjà existantes (exemple : Incinérateur UIOM – 850 °C // oxy-bruleurs 1200 – 1500°C // gazéification - 1200 – 1500 °C // four à ciment 1100 – 1500 °C) en y apportant des modifications en particulier au niveau des systèmes d'alimentation qui doivent garantir le confinement des fibres d'amiante et du contrôle de l'empoussièrément de manière générale.

Les installations devront également tenir compte des émissions SO_x / NO_x pouvant provenir des matériaux liés à l'amiante (plâtre, ciment...), des gaz acides dans le cas d'utilisation d'acides dans la phase chimique du traitement ainsi que de rejets autres (tels que solvants et métaux lourds provenant des peintures / colles ...etc).

Cette approche visant l'utilisation d'installations déjà existantes aboutit généralement à un déchet traité mais faiblement valorisable. Tout en soulignant le cas spécifique des brevets proposant de valoriser l'amiante dans la fabrication de clinker (en four à ciment)

La plupart des procédés recherchant à aboutir à un déchet traité à forte valeur ne sont envisageables que dans des installations dédiées.

On peut citer la production de Zéolite, de Silice pure, ainsi que les procédés permettant de récupérer les éléments métalliques de l'amiante (Mg / Fe / Ca/... etc).

Sont présentés ici les mécanismes chimiques d'oxydo réduction à la base des procédés de traitement étudiés et qui permettent d'altérer la structure fibreuse de l'amiante.

3.1.2.1. Traitement thermique

3.1.2.1.1. Fusion

Selon le type d'amiante, le point de fusion varie de 1200°C à plus de 1500°C.

Type d'amiante	Point de fusion (°C)
Chrysotile	1521
Amosite*	1399
Crocidolite*	1229

Figure 54 Tableau des points de fusion par rapport au type d'amiante

La fusion de l'amiante a pour conséquence la destruction de sa structure cristalline fibreuse et aboutit à un composé vitreux.

Du fait de la faible conductivité thermique de l'amiante, il sera nécessaire d'utiliser des T° significativement au-dessus du point de fusion et/ou des durées de traitement importantes et/ou un broyage permettant de réduire la granulométrie du déchet amianté.

Bien que coûteux et consommateurs d'énergie, les procédés de fusion ont l'avantage de pouvoir traiter tous types de déchets amiantés et de détruire en même temps d'éventuels composés organiques présents dans le déchet (y compris des composés toxiques tels que le PCB).

Un procédé de fusion utilisant une torche à plasma existe en France avec l'usine de vitrification INERTAM basée à Morcens (33)

3.1.2.1.2. Déshydratation

Tous les types d'amiantes, parce qu'ils possèdent des radicaux hydroxyles (OH) sont sensibles au traitement thermique en deçà de leur point de fusion.

En effet, lors du traitement thermique, les ions hydroxyles sont libérés sous forme d'eau. Le traitement thermique revient à une déshydratation/évaporation de « l'eau de structure » contenue dans l'amiante aboutissant à la transformation de sa structure chimique et physique.

Ce processus démarre à partir de 600 °C pour le chrysotile et on obtient une déshydratation complète et une recristallisation en forstérite et silice vers 800-850°C qui présentent toujours une structure cristalline mais plus de structure fibreuse.

Le processus démarre entre 400 et 600°C pour les amphiboles et conduit à une dégradation thermique complète vers 900°C et l'obtention des minéraux suivants : pyroxènes, magnetite, hématite et silice.

Type d'amiante	Décomposition thermique (°C)
Chrysotile	600-850
Amosite*	600-900
Crocidolite*	400-900

Figure 55 Tableau de décomposition thermique par rapport au type d'amiante

La déshydratation complète de l'amiante a une durée de 6 à 8 heures.

Malgré de possibles améliorations de la cinétique de déshydratation (par broyage préalable, ou utilisation de vapeur surchauffée), **un procédé de traitement purement thermique reste très consommateur en énergie et couteux. De plus, les minéraux issus du procédé présentent un faible potentiel de valorisation.**

Dans l'ensemble des brevets étudiés, le développement des procédés thermochimiques visent donc 2 axes d'amélioration :

- ✓ Abaisser la T° de conversion des amiantes en structure non fibreuses
- ✓ Tenter de récupérer des sous-produits de la conversion de l'amiante pour en faire des matières premières secondaires à forte valeur ajoutée.

De plus, tous les procédés de déshydratation sont potentiellement problématiques dans le cas de déchets amiantés contenant des composés organiques. En effet, ces procédés entraînent l'émission de composés gazeux, de fractions semi-liquides ou de résidus carbonés limitant la diffusion de température (et qui ralentissent donc le processus de déshydratation) et pouvant également contenir des composés toxiques tels que des hydrocarbures polycycliques aromatiques par exemples.

3.1.2.2. Traitements thermochimiques

La « famille » des traitements thermochimiques est la plus large. Dans un environnement de température plus ou moins élevé (De 80°C à 1400 °C), de nombreux procédés chimiques agissent sur l'amiante.

3.1.2.2.1. Réaction aux acides

Les acides dissolvent (par lixiviation) les composants cations de l'amiante (fer et magnésium).

On retrouve ensuite ces composants en solution, sous forme de sels formés avec l'acide utilisé.

Le magnésium notamment est une partie importante tant du chrysotile (environ 33 %) que des amphiboles (entre 6 et 25 %).

Même si l'efficacité de la réaction augmente avec le pH, plusieurs brevets proposent l'utilisation d'acides faibles, y compris des acides organiques tels que l'acide oxalique (Formule = HOOC-COOH).

Ceci pour réduire les problématiques liées à la gestion de l'acide aussi bien en début de procédé (stockage / manipulation) qu'à la fin (neutralisation de l'acide résiduel).

Du fait de leur structure moléculaire différente, la lixiviation des ions Mg²⁺ est plus ou moins efficace selon le type d'amiante amphibole ou chrysotile

Comme évoqué précédemment, dans le cas du chrysotile, le magnésium se trouve à l'extérieur de sa structure moléculaire : il pourra ainsi être lixivié de la surface.

En revanche, dans les fibres amphiboles, le magnésium est en quelque sorte « prisonnier » à l'intérieur de la structure cristalline. De ce fait, les amphiboles montrent une résistance plus importante aux acides.

On peut mentionner ici l'efficacité particulière de l'acide fluorhydrique. Cet acide est le seul qui au-delà de la lixiviation du magnésium est également capable de dissoudre le squelette silicique des amiantes en formant des fluoro-silicates (SiF₄) solubles dans l'eau. L'acide fluorhydrique est ainsi l'acide le plus efficace pour détruire les structures asbestiformes.

Cependant, le caractère nocif et dangereux de l'acide fluorhydrique rend son utilisation à échelle industrielle complexe et couteuse.

Il est intéressant également de mentionner l'utilisation d'acide Sulfurique (H_2SO_4) sur un déchet amiantés contenant du Calcium (C'est le cas des liants hydrauliques tels que ciment et plâtre). L'acide sulfurique en réagissant avec le calcium va former un sulfate de Calcium ($CaSO_4$) qui est une matière première dans la fabrication de ciment.

Bien que certains brevets proposent une attaque acide à froid, le procédé acide est présenté dans cette étude comme thermochimique.

En effet d'un point de vue chimique et dialectique, une réaction avec un acide libère toujours de la chaleur, et d'autre part la plupart des brevets proposant une attaque acide proposent également un traitement thermique. car cela améliore la cinétique des réactions

A noter aussi que tout traitement à l'acide nécessite une étape ultérieure pour neutraliser l'acide résiduel non consommé dans la réaction avec l'amiante.

3.1.2.2.2. Réaction aux bases fortes

En libérant des ions OH^- , toutes les bases fortes (soude / potasse notamment) en solution agissent sur l'amiante. A l'issue de ce traitement, on retrouve les cations métalliques de l'amiante en solution sous forme d'hydroxydes (notamment Mg).

Ces cations auront été substitués par les éléments K ou Na provenant de la solution basique

Cependant, ces réactions nécessitent des températures de l'ordre de $250^\circ C$ minimum et des pressions élevées (de l'ordre 40bars) ainsi qu'un broyage fin pour obtenir des temps de traitement limités.

Enfin, ces procédés nécessitent une grande quantité de base (presque autant que la quantité de déchets) qui doivent ensuite être neutralisées avec de grandes quantités d'acide, ce qui rend là encore le procédé coûteux et difficile à mettre en œuvre à une échelle industrielle.

Cette approche est relativement peu abordée dans les brevets étudiés.

3.1.2.2.3. Réactions aux agents minéralisants (transformation minéralogique)

Cette famille de procédés de traitement propose l'utilisation d'agents (**agents minéralisants**) qui vont participer à la minéralisation de l'amiante. Ils vont convertir l'amiante en une autre matière minérale non amiantée.

Ces procédés consistent à mettre en contact l'amiante avec d'autres molécules à base de silice.

Les molécules de substitution vont présenter une très forte affinité physicochimique avec l'amiante, due à l'analogie de configuration entre les espèces silicatées présentes à la fois dans les amiantes cristallins et dans ces molécules d'apport.

Elles vont se greffer sur les surfaces amiantées et polymériser en un réseau dense et compact comme un véritable verre de synthèse. Les fibres font alors partie intégrante du réseau de polymère et peuvent être considérées comme des éléments constitutifs de ce réseau.

Cette phase de polymérisation est liée au séchage du complexe amianté (libération des ions OH^-). Sa cinétique est donc liée à l'élévation de T° .

Ce principe a été étudié initialement par l'industrie de fabrication du verre (voir procédé sol-gel). En effet, il permet de fabriquer un verre sans fusion de silice (très consommatrice d'énergie).

Les agents minéralisants sont particulièrement intéressants pour solidifier/encapsuler l'amiante au niveau des chantiers afin de faciliter la dépose et le transport en limitant l'émission de fibres.

3.1.2.2.3.1. Exemple des silicates alcalins

Pour expliciter plus en détail le principe de transformation minéralogique, est présentée ici l'action des silicates alcalins, particulièrement récurrents dans les brevets étudiés et plus spécifiquement du silicate de sodium Na_2SiO_3 aussi appelé « verre soluble ».

Vis-à-vis de l'amiante, deux propriétés essentielles des silicates alcalins sont mises en œuvre :

- d'une part, la très forte affinité physique et chimique des silicates alcalins en solution pour les surfaces et interfaces solides silicatées (motifs SiO_4 et groupements Si-OH), telles les amiantes qui fait que les silicates adhèrent très fortement aux surfaces amiantées, dès qu'ils se trouvent en contact intime avec elles.
- d'autre part, l'évolution des structures silicates vers des produits polymériques de plus en plus insolubles (ces solutions à la limite génèrent une structure de type vitreuse, qui peut devenir totalement insensible à l'eau s'il est complètement déshydraté) au cours du séchage, soit à T° ambiante, soit à température plus élevées (80 à 120 °c, ou au-delà).

La conjugaison de ces deux propriétés fait qu'il s'établit d'abord un contact intime entre silicate et amiante, puis par séchage et donc évaporation d'eau, qu'il se forme un composé d'addition nouveau, grâce à des polycondensations (gélification) entre des Si-OH de l'amiante et des Si-OH du silicate de sodium. Ceci s'accompagne d'une libération d'eau



Ce composite silicate peut être assimilé à un amalgame comportant des zones encore cristallines (provenant des amiantes) chimiquement accrochées à des zones vitreuses, amorphes, provenant de la déshydratation des silicates de sodium.

L'amiante n'est pas ici totalement transformé, en revanche, on est in fine en présence d'un composite, mécaniquement solide, renforcé, contenant l'amiante situé au cœur des macrostructures et empêchant la libération de fibres.

Cette famille de procédé, présente l'avantage de pouvoir être mise en œuvre en 2 étapes distinctes dans le temps et dans l'espace.

L'étape d'imprégnation peut être mise en œuvre sur chantier afin d'encapsuler et solidifier l'amiante. En plus d'initier la destruction de la structure fibreuse des amiantes, l'obtention d'un composite dans lequel les fibres d'amiante ne sont pas seulement enrobées, mais sont intimement liées à un produit amorphe va faciliter les opérations de dépose en limitant l'empoussièrement (plus ou moins selon si l'imprégnation a été suffisante en quantité et en homogénéité).

3.1.2.2.3.2. Autres agents minéralisants

En dehors des silicates alcalins, d'autres agents minéralisants ayant un mode d'action similaire sont proposés au travers des différents travaux de recherche, et notamment :

- Silicates de métaux alcalino-terreux (Mg / Ca),
- Composés organo-siliciques (ex=alkoxysilane),
- Résine silicone.

En pré-traitement (sur chantier), ces agents minéralisants sont utilisés en phase aqueuse et appliqués le plus souvent par pulvérisation.

Il peut exister également des techniques d'imprégnation à cœur (par des batteries d'aiguille par exemple) dont la mise en œuvre nécessite des équipements plus complexes. Ce type de technique pourra être utilisé pour consolider l'amiante en place (encapsulation) sans objectif de dépose.

En phase de traitement, ces agents minéralisants pourront être utilisés en solution aqueuse ou en composé solide à mélanger de manière homogène (broyage et malaxage). Ils auront alors un rôle de fondant.

3.1.2.3. Procédés et réactifs permettant d'améliorer la cinétique et le rendement des réactions de déstructuration de l'amiante

Les processus décrits précédemment peuvent être complétés par des procédés complémentaires visant à améliorer le rendement et/ou la cinétique de réaction.

Ces procédés complémentaires peuvent être mécaniques ou chimiques et intervenir à différents stades.

3.1.2.3.1. Procédés chimiques

De façon optionnelle, les processus de base peuvent être améliorés par des additifs de 2 types :

- Des agents tensio-actifs qui vont faciliter le mouillage de l'amiante par un acide, une base ou un agent minéralisant
- Des agents complexants des ions métalliques qui « capturent » et « sequestrent » les cations métalliques de l'amiante (Fe et Mg en particulier) et ainsi favorisent la continuité des réactions.

La combinaison de ces actions entraîne « l'effondrement » de la structure cristalline.

3.1.2.3.1.1. Agents Tensio-actifs

Les tensio-actifs (ou agents de surface ou surfactants) améliorent le mouillage des déchets amiantés par les réactifs.

En diminuant la tension superficielle solide-liquide, ces agents mouillants permettent un plus grand étalement du liquide. Ce pouvoir mouillant participe aussi à la mise en suspension stable de particules solides dans un liquide dans lequel elles sont insolubles, en chassant la couche d'air adhérent aux particules qui gêne la dispersion dans la phase liquide.

Les agents tensio-actifs sont donc toujours utilisés en phase aqueuse.

Les tensio-actifs les plus connus sont des agents fluorés, (des alcools sont également souvent proposés).

3.1.2.3.1.2. Agents complexants des métaux

L'utilisation d'un agent complexant des métaux ou un agent précipitant les métaux, favorise la réaction en « évacuant » les ions métalliques au fur et à mesure de leur libération du déchet amianté.

Ils peuvent être utilisés soit en phase aqueuse soit en phase solide, on retrouve notamment les agents suivants :

- Fluorures (Halogènes)
- Sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (et composé d'ammonium de manière générale)
- Hydroxyde de métal alcalin en solution aqueuse,
- Borate de métal alcalin (Borax / borate de calcium)
- K_2SO_4 (Sulfate de potassium utilisé comme stabilisant de métaux lourds (voir JP2011031183))

Exemple des halogènes et plus particulièrement des fluorures

Les halogènes sont les éléments appartenant à la 17ème colonne du tableau périodique des éléments (Fluor, Chlore, Brome, Iode, Astate).

Ils réagissent avec la plupart des métaux et notamment avec les métaux alcalino-terreux (Mg / Ca) et les métaux alcalins (Na /K) pour former des composés ioniques tels que NaCl ; CaCl₂... etc.

En particulier, les ions fluorures vont présenter une forte réactivité avec les cations métalliques de l'amiante (Mg, Na, Ca, Fe).

Ayant par ailleurs la particularité de dissoudre le squelette silicique, les fluorures sont souvent proposés comme mode de traitement des amiantes et notamment par l'utilisation de Fluorure de Calcium (CaF₂).

A noter que les ions fluorures étant particulièrement agressifs, leur utilisation nécessite des précautions spécifiques en amont (stockage / manipulation) et en aval des procédés (neutralisation des fluorures résiduels).

En dehors des fluorures, d'autres composés peuvent être utilisés comme agents complexants comme le sulfate d'ammonium (complexe le magnésium en sulfate de magnésium), les hydroxydes de métaux alcalins ou les borates.

De manière générale tous ces procédés devront prévoir une étape de filtration afin de récupérer la phase solide.

La phase liquide devra être traitée pour récupérer ou neutraliser les différents composants (fluorures / composés métalliques) y compris les composants organiques provenant d'éventuelles pollutions (graisses) ou produits associés au déchet amiantés (colles, peintures.. etc).

3.1.2.3.2. Fondants

Un fondant est un produit permettant d'abaisser la température de fusion d'un ou plusieurs éléments ou composés chimiques.

Contrairement à un catalyseur (qui est généralement reconstitué en fin de réaction et dont les composés ne se retrouvent pas dans les produits finaux), la présence et la nature d'un fondant a un impact notable sur le produit final obtenu et ses propriétés tant physiques que chimiques.

Les acides, les bases et les agents minéralisant explicités précédemment jouent in fine un rôle de fondant.

Cependant il est apparu intéressant d'y consacrer un chapitre spécifique du fait de la grande variété de réactifs proposés dans les brevets étudiés et qu'ils permettent d'abaisser la température de traitement de l'amiante pour aboutir à une déstructuration complète.

Il s'agit notamment des composés de bore (Borax), de phosphore (phosphates de sodium ou de calcium), des composés siliciques (silicates de métaux alcalins...), des carbonates formés à partir de métaux alcalins ou alcalino-terreux (carbonates de sodium, potassium, lithium, barium), des composés chlorés, des composés calciques, des composés fluorés (fluorure de calcium), ainsi que des métaux tels que le fer, le potassium, l'aluminium (JP2007209831) ...

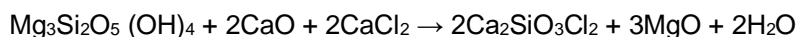
A noter plus particulièrement, l'utilisation de composés chlorés et calciques qui revient de manière récurrente dans les brevets étudiés. Il faut également noter ici que tous les fondants ne sont pas compatibles avec les processus de base (par exemple l'utilisation de chaux dans le cadre d'une attaque acide sera contre-productive car elle neutralise l'acide utilisé).

3.1.2.3.2.1. Exemple des composés calciques

De nombreuses études montrent que l'amiante réagit avec les composés de calcium et notamment :

- CaCO₃ (carbonate de calcium),
- CaO (chaux vive – oxyde de calcium),
- Ca(OH)₂ (chaux éteinte ou hydroxyde de calcium ou Portlandite),
- CaCl₂ (chlorure de calcium).

Par exemple, avec de l'amiante chrysotile (JP2008049213):



La réaction se produit à partir de 1000°C et au-delà, on observe en particulier la destruction des liaisons Mg-Si du déchet amianté (substitution partielle de Mg par Ca et OH par Cl) et la formation de MgO (oxyde de magnésium) et CaSiO₄ (silicate de calcium) qui entre notamment dans la composition du clinker.

Il est intéressant de souligner que dans le cas d'un déchet amiante/ciment, CaO est apporté par le ciment lui-même.

3.1.2.3.2.2. Exemple des composés chlorés

Il est également démontré que la présence de composés chlorés (CaCl₂, NaCl...) va agir comme un fondant.

Avec CaCl₂ notamment, le phénomène s'explique par le fait que la présence de CaCl₂ va créer des masses calciques fondues (T° fusion CaCl₂ = 772 °C // NaCl=801°C) et ainsi augmenter la surface d'échange entre amiante et réactifs. Sans la présence de CaCl₂, on assiste à une réaction solide-solide qui est plus longue (idem pour tous les composés chlorés ou calciques ayant une T° de fusion basse).

Ceci est valable pour le chrysotile ; amosite et crocidolite auront un comportement similaire mais avec des T° de traitement plus élevées et une cinétique de réaction plus lente.

Il faut noter cependant que l'addition de composés chlorés complique le traitement des émissions et le recyclage des produits finaux.

3.1.2.3.3. Catalyseurs

Bien qu'assez rares, certains brevets proposent l'utilisation de catalyseurs et notamment le dioxyde de titane (TiO₂) qui est un photocatalyseur très classique dans l'industrie, car thermodynamiquement stable, non toxique et économique.

TiO₂ servira principalement à minéraliser d'éventuels polluants organiques présents dans les déchets amiantes (alcanes, alcènes, alcools, pesticides, etc.) mais aussi de réduire par exemple les NO_x.

Ayant balayé un horizon assez large de réactifs utilisés dans les différents procédés étudiés, il apparaît que certains composés chimiques cumulent plusieurs propriétés.

De nombreux procédés vont finalement utiliser des produits relativement simples et combinant ces différentes propriétés. En particulier on retrouvera souvent des procédés à base d'acide (HF / HCl), de silicates alcalins et des additifs à base de calcium, de chlore et de fluorure tels que CaF₂, CaCl₂, Ca(OH)₂.

3.1.2.3.4. Utilisation d'H₂O₂

L'utilisation du peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée, H₂O₂) est proposée dans plusieurs brevets du fait de son fort pouvoir oxydant. Il présente un intérêt dans le cas d'une contamination des déchets amiantés par des pollutions (ou une matrice d'origine) organiques.

3.1.2.4. Procédés mécaniques

Les procédés mécaniques de broyage, malaxage, pressage améliorent systématiquement la cinétique et le rendement des réactions mais sont consommateurs d'énergie et peuvent générer des difficultés supplémentaires liées à la libération de fibres.

Les coûts supplémentaires engendrés devront faire l'objet d'un arbitrage vis-à-vis du gain obtenu en termes de durée de traitement et de rendement.

3.1.2.4.1. Broyage

Le broyage préalable du déchet amianté seul ou en présence de réactifs, en phase humide ou en phase sèche améliore toujours la cinétique et le rendement des procédés en augmentant les surfaces d'échange.

En revanche, ce broyage, notamment en phase sèche, crée des difficultés supplémentaires concernant le contrôle des poussières que les installations devront prévoir (broyage en dépression, confinement, filtres à poussière, mesure de l'empoussièrement en différents points de l'installation).

On préfère souvent un broyage en phase humide, en mélange avec un combustible (huiles lourdes) ou avec différents réactifs.

Ainsi, on retiendra les brevets JP2010036153 et JP2008272586 qui proposent de déstructurer l'amiante par un procédé de broyage mécanique (avec un broyeur à impact – type broyeur planétaire avec une granulométrie très fine < 75 µm) après un traitement chimique permettant de substituer les ions Mg par des ions Al ou Ca.

L'atome Ca étant plus gros que Mg, la structure fibreuse de l'amiante est suffisamment fragilisée pour être détruite par ce seul procédé mécanique.

3.1.2.4.2. Malaxage

Le malaxage préalable au traitement, ou en cours de traitement (c'est-à-dire en présence des réactifs) améliore systématiquement le rendement en favorisant le contact des réactifs avec le déchet amianté.

Le malaxage assure également un traitement homogène du déchet et limite le risque d'avoir des fractions d'amiante non traitées en fin de procédé.

3.1.2.4.3. Pressage / Frittage

« Le frittage est la consolidation par action de la chaleur d'un agglomérat granulaire plus ou moins compact, avec ou sans fusion d'un ou de plusieurs de ses constituants ».

Le pressage ou le frittage sont proposés dans divers brevets. Ces procédés interviennent après la phase de traitement chimique et de broyage / malaxage et avant la phase de traitement thermique. Le compactage du broyat permet d'augmenter sa densité et ainsi :

Améliorer la diffusion de chaleur au sein du déchet lors de la phase de traitement thermique
Augmenter le poids des batch traités (dans le cas d'un procédé discontinu).

Le broyat compressé est parfois granulé à nouveau en particules plus fines mais chacune ayant une densité plus importante que le broyat original. Ces particules denses et de granulométrie uniforme sont alors chauffées.

3.1.2.5. Autres procédés

3.1.2.5.1. Ultrasons

La sonochimie est un domaine de la chimie qui étudie les effets des ondes ultrasonores sur les réactions chimiques.

Ces effets chimiques ne sont pas dus à une interaction directe entre l'onde ultrasonore et les molécules.

Le phénomène de cavitation acoustique est à l'origine des transformations chimiques observées.

Lorsque l'onde ultrasonique se propage dans un milieu liquide (solvant), elle génère des petites bulles de gaz ou de vapeur appelées bulles de cavitation. Celles-ci grossissent avec le temps jusqu'à atteindre une taille critique où elles implosent (s'effondrent), créant selon la théorie des points chauds, des conditions locales de pression et de température extrêmes (4 500 à 5 000 °C et 1 700 atm). En fournissant une grande quantité d'énergie, cette implosion favorise localement la cinétique et le rendement des réactions chimiques en jeu.

3.1.2.5.2. Traitement par micro-ondes

Les micro-ondes agissent comme des champs électriques et réchauffent généralement tout matériel contenant des charges électriques mobiles, comme les molécules polaires dans un solvant ou les ions conducteurs dans un solide.

Les avantages des fours micro-ondes par rapport aux fours conventionnels sont :

- ✓ amélioration des rendements ;
- ✓ amélioration des sélectivités ;
- ✓ réduction des temps de chauffage ;
- ✓ température uniforme dans le réacteur ;
- ✓ possibilité de travailler sans solvant ;
- ✓ vitesse de réaction plus élevée.

Dans le cas de l'amiante, les ondes hautes fréquences émises par un générateur pourront faire vibrer les groupements hydroxyles et améliorer ainsi la déshydratation du déchet. La sélectivité des fréquences permettra notamment de réaliser cette déshydratation de l'amiante au sein de son liant (complexe amiante ciment par exemple)

3.1.2.5.3. Décharge plasma

Quelques brevets proposent d'utiliser des composés calciques en solution aqueuse.

L'eau de la solution ayant préalablement été traitée par des décharges plasma.

Ce traitement préalable va améliorer la pénétration de la solution dans l'amiante, favoriser son imprégnation par les réactifs et in fine améliorer la substitution d'ions Mg par Ca ce qui, comme évoqué précédemment, permet ensuite de déstructurer l'amiante à des températures de l'ordre de 800 °C.

3.1.2.6. Fabrication du ciment / procédé de clinkerisation

Le ciment est fabriqué à partir de clinker auquel on ajoute, après refroidissement, du gypse (minéral de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) afin d'apporter des sulfates qui permettent de ralentir la prise du ciment.

Le tout est broyé en une fine poudre (gains de 40 microns environ), la poudre obtenue est du ciment Portland. Pour obtenir d'autres types de ciments, on mélange avant broyage d'autres composés comme des résidus de la sidérurgie (laitier de hauts fourneaux), des cendres volantes de centrales électriques, etc ...

On peut mentionner le cas de ciment à prise rapide qui peut être fabriqué par ajout de fluorure de calcium (CaF₂) et d'alumine (Al₂O₃) aux composants d'un ciment Portland classique pour former un fluoroaluminat de calcium 11CaO.7Al₂O₃.CaF₂, qui accélère la prise du ciment.

Le clinker est obtenu par le procédé de Clinkerisation qui consiste à cuire un mélange appelé cru ou « farine » sous forme de poudre très fine (de diamètre inférieur à 200 µm). Ce cru formé à partir de :

- Calcaire (source de carbonate de calcium - CaCO₃,
- Argile (Source de silice - SiO₂, d'alumine - Al₂O₃ et d'oxyde de fer -Fe₂O₃).

La clinkerisation a lieu dans des fours à ciment (Rotary Kiln) de forme cylindrique longs d'environ 100 mètres et de diamètre environ 5 mètres qui tournent lentement à 2 ou 3 tours par minute.

Ils sont légèrement inclinés par rapport à l'horizontale de telle sorte que le cru entre par la partie la plus haute du four. Le brûleur est situé au fond du four et produit une flamme à environ 2000°C. Il s'établit un gradient thermique entre l'entrée du four et la sortie de celui-ci de 800°C à 1500°C environ. La durée de séjour dans le four est d'environ une demi-heure.

La clinkerisation correspond à une suite de transformations minérales lors du parcours dans le four (et notamment la formation de CaO par décarbonatation du CaCO₃ // CaO qui va ensuite participer à la formation d'autres composés finaux) avant d'aboutir à un composé nommé clinker dont la composition minéralogique est la suivante :

Nom	Formule	Minimum	Maximum
Alite (silicate tricalcique)	Ca ₃ SiO ₅	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	Ca ₂ SiO ₄	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	Ca ₃ Al ₂ O ₆	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétracalcique	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	CaO	0.6 %	2.8 %

Figure 56 Composition minéralogique du clinker

Considérant que,

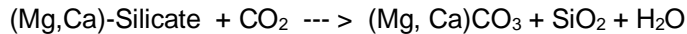
- ✓ Les déchets amiantés ont une composition minéralogique proche des argiles (aluminosilicates hydratés),
- ✓ Les déchets amiantés sont souvent liés à du ciment (CaO) ou du plâtre (CaSO₄),
- ✓ Les températures du four (800-1500°C) et les durées de traitement sont suffisantes pour dénaturer la structure fibreuse de l'amiante après contact avec un fondant mais aussi pour détruire les éventuels polluants organiques,

Il apparaît pertinent d'explorer cette voie de valorisation, ce que n'ont pas manqué de faire les cimentiers japonais (une cinquantaine de brevets déposés sur le sujet).

3.1.3. Autres procédés de traitement de l'amiante

3.1.3.1. La Carbonatation minérale

La carbonatation minérale est un processus naturel qui se produit de façon lente à pression et température ambiantes et qui transforme progressivement les minéraux silicates riches en calcium et/ou en magnésium en divers carbonates. Cette carbonatation se fait par dissociation de CO₂.



Ce principe de la carbonatation minérale est particulièrement étudié dans le domaine de la recherche sur le stockage de CO₂ afin de lutter contre le réchauffement climatique.

L'avantage est de pouvoir séquestrer du CO₂ de manière stable au sein d'un minéral.

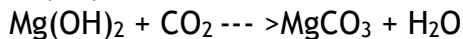
Le principal défi à relever pour rendre ce processus viable industriellement consiste à améliorer sa cinétique et son rendement.

Depuis un peu plus d'une décennie, les résultats expérimentaux de carbonatation minérale ne cessent de s'améliorer sur les plans de la rapidité, des conditions physico-chimiques de réaction et du taux de production des carbonates.

La réaction de carbonatation peut être directe (par voie sèche) ou indirecte si l'on passe par une phase de dissolution intermédiaire (par voie humide).

3.1.3.2. Réaction de carbonatation par voie humide

Le principe consiste à extraire dans un premier temps les ions Mg / Ca par dissolution ou lixiviation en milieu acide (comme nous avons pu le voir précédemment) sous forme d'oxyde de calcium Ca(OH)₂ ou de magnésium Mg(OH)₂ qui serviront ensuite à la carbonatation.



Bien que la carbonatation minérale soit un processus exothermique (et donc réduisant l'apport d'énergie supplémentaire), la méthode par voie humide présente un bilan énergétique défavorable et donc un bilan carbone négatif.

3.1.3.3. Réaction de carbonatation par voie sèche

La carbonatation minérale directe gaz-solide est beaucoup plus économique en comparaison avec celle en phase aqueuse, puisque cette voie de séquestration de CO₂ n'a recours qu'au solide jouant le rôle d'adsorbant et le mélange gazeux contenant le CO₂.

Cependant la cinétique et le rendement obtenus sont relativement faibles bien qu'ils puissent être améliorés par divers procédés et notamment :

- Déshydratation partielle préalable (permet de libérer des groupes hydroxyles situés en surface de l'amiantes qui nuisent à la réaction de carbonatation en occupant des sites actifs),
- Broyage préalable pour augmenter les surfaces d'échange,
- Dopage de la surface de l'amiantes par des métaux alcalins Li, K, Na et Cs pour augmenter la basicité de la surface,
- Injection de CO₂ en conditions supercritiques (exemple de conditions supercritique du CO₂ : 31°C / 74 bars).

Il est à noter qu'en l'état actuel des connaissances, même si certains de ces procédés sont intéressants sur le plan théorique, ils ne garantissent pas un bilan carbone positif dans le cadre d'une application industrielle.

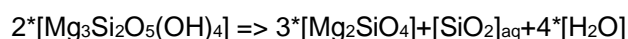
Appliqués à l'amiante, ils ont en théorie, l'avantage de répondre au risque sanitaire et de produire un sous produit valorisable (CaCO₃ // Mg CO₃), le bilan carbone positif n'étant pas ici le but recherché. Cependant, la carbonatation par voie humide ne présente pas d'intérêt dans le cadre de notre étude.

En effet elle nécessite une attaque acide préalable qui permet déjà d'atteindre l'objectif de déstructuration de la structure fibreuse de l'amiante. Et la carbonatation par voie sèche présente de très fortes contraintes d'industrialisation.

3.1.3.4. Oxydation hydrothermale / eau supercritique

A de fortes températures et pressions, appelés conditions supercritiques, l'eau peut se comporter comme un solvant d'espèces minérales. Quelques brevets proposent un traitement de l'amiante dans ces conditions.

Le brevet WO 2005/000490 propose ainsi de dissoudre l'amiante avec de l'eau supercritique (T= 680°C // P= 267 bars) avec une durée de traitement de 3 heures selon la réaction suivante :



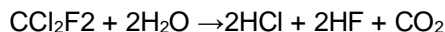
Un autre brevet reprend cette méthode en rajoutant du peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) pour prendre en compte y compris des déchets amiantés avec des pollutions organiques.

Le traitement de déchets dans des conditions supercritiques reste à valider sur un plan industriel.

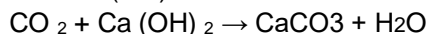
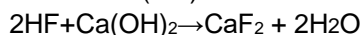
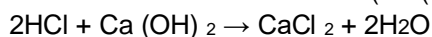
3.1.3.5. Co-destruction avec des CFC

L'élimination de CFC se fait par crackage (très hautes T° de l'ordre de 10.000 °C) avec production d'acide chlorhydrique et acide Fluorhydrique sous forme gazeuse.

Réaction :



Puis neutralisation à la Chaux (Ca (OH)₂):



Les produits issus de cette décomposition et notamment CaF₂ peuvent être utilisés pour traiter l'amiante.

Mais deux autres méthodes proposent d'utiliser directement l'acide fluorhydrique issu du crackage pour traiter et dissoudre l'amiante.

Ces procédés sont intéressants sur le plan théorique mais posent grand nombre de problèmes de gestion des effluents. De plus ils ne concernent aujourd'hui que de l'amiante pure. Aucun essai n'ayant été réalisé sur des déchets amiantés.

3.2. Aspects réglementaires liés au traitement des déchets de matériaux fibreux contenant de l'amiante

Les déchets de matériaux fibreux contenant de l'amiante sont selon le Code de l'environnement des déchets dangereux.

➤ **Toutes les installations de traitement de déchets dangereux sont des ICPE :**

La Directive Européenne n° 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets indique en son Article 23 : « *Les États membres imposent à tout établissement ou toute entreprise comptant procéder au traitement de déchets l'obligation d'obtenir une autorisation des autorités compétentes. ...* »

En France, cette obligation a été transposée à travers la nomenclature des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et les prescriptions réglementaires applicables à chaque installation concernée par une de ses rubriques de classement.

Un certain nombre de rubriques ICPE sont directement en lien avec des filières de gestion des déchets mais une installation de traitement des déchets peut aussi d'être autorisée au titre d'autres rubriques si son activité l'exige (Annexe I à l'article R511-9 du Code de l'Environnement relative à la nomenclature ICPE).

Les rubriques ICPE qui peuvent correspondre aux technologies de traitement des déchets contenant de l'amiante, actuelles ou en cours de développement, sont les suivantes :

- 2718 - Transit, regroupement ou tri de déchet dangereux
- 2770 – Traitement thermique de déchets dangereux
- 2790 – Traitement de déchets dangereux
- 2760 – Stockage de déchets autres que ceux mentionnés à la rubrique 2720 [rubrique 2720 : Stockage de déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales ainsi que de l'exploitation de carrières]

En conséquence, toute mise en œuvre et exploitation d'un procédé de traitement de déchets contenant de l'amiante doit être dûment autorisé au titre de la réglementation ICPE.

Actuellement, le traitement des déchets contenant de l'amiante s'organise autour de trois typologies d'installations de traitement :

- Les installations de stockage de déchets dangereux
- Les installations de stockage de déchets non dangereux
- Les installations de traitement thermique (incinération, co-incinération et vitrification).

Des prescriptions spécifiques sont définies pour ces 3 typologies de traitement :

➤ **Traitement par stockage en installation dédiée aux déchets dangereux de déchets contenant de l'amiante**

L'Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux indique en son Article 43 : « *Tous les déchets contenant de l'amiante sont admissibles dans les installations de stockage visées par le présent arrêté.* »

Les règles de conditionnement des déchets contenant de l'amiante et d'acceptation sur une installation de stockage sont précisées (Articles 44 et 45) :

« *L'exploitant vérifie que les **déchets contenant de l'amiante arrivent sur son site en double conditionnement étanche et étiqueté « amiante** ». Tout conditionnement devra être identifié et fermé au moyen d'un scellé numéroté. Le scellé mentionnera le numéro de SIRET de l'entreprise qui a conditionné l'amiante et un numéro d'ordre permettant l'identification univoque du conditionnement.*

L'exploitant vérifie également que le chargement est **accompagné d'un bordereau de suivi des déchets amiantés (BSDA)** sur lequel sont indiqués les numéros des scellés et qui précise :

- l'identité du maître d'ouvrage qui a commandé les travaux de désamiantage ;
- l'identité de l'entreprise qui a effectué les travaux de désamiantage ;
- l'identité du transporteur ayant apporté les déchets jusqu'à l'installation de stockage.

Afin de limiter pour les agents de l'installation de stockage le risque d'inhalation de l'amiante, l'exploitant n'est pas tenu de mettre en œuvre les prescriptions du chapitre Ier du titre V [Vérification des déchets] et du chapitre III du titre Ier [Procédure d'acceptation préalable d'un déchet et vérification à l'arrivée] sous réserve que les prescriptions des deux alinéas précédents soient respectées...»

Pour un chargement donné, l'exploitant de l'installation de stockage doit pouvoir donner le lieu précis du stockage et les numéros des scellés.

Lorsque le déchet est définitivement accepté sur le site de stockage, un accusé de réception écrit est délivré au producteur ou détenteur du déchet.(...) »

« **Les déchets contenant de l'amiante ne sont pas mélangés avec d'autres déchets dans une même alvéole** si ce n'est au-dessus et au-dessous. L'alvéole destinée aux déchets contenant de l'amiante est entourée d'alvéoles de déchets solidifiés. Les techniques de mise en œuvre permettent de garantir la traçabilité et la stabilité de cette alvéole. Il n'est pas exploité plus d'une alvéole de déchets contenant de l'amiante à la fois. Les déchets conditionnés sont manipulés et stockés de manière à éviter au maximum les risques de dispersion des fibres. Des consignes sont données aux employés de l'installation de stockage dans ce sens. »

- **Traitement par stockage en installation dédiée aux déchets non dangereux des déchets d'amiante lié à des matériaux inertes et des déchets de terres amiantifères.**

L'Arrêté du 15 février 2016 relatif aux installations de stockage de « déchets non dangereux », en vigueur au 1^{er} juillet 2016, définit en son Article 1 :

- « **Déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante** : déchets générés par une activité de construction, rénovation ou déconstruction d'un bâtiment ou par une activité de construction, rénovation ou déconstruction de travaux de génie civil, **tels que les déchets d'amiante lié à des matériaux inertes ayant conservé leur intégrité, les déchets de terres naturellement amiantifères et les déchets d'agrégats d'enrobés bitumineux amiantés.** »
- « **Mono-déchets : déchets de même nature non mélangés.** Les déchets biodégradables ne peuvent pas être considérés comme des mono-déchets. »

On remarquera que les déchets contenant de l'amiante sont considérés comme des « mono-déchets » qui sont par définition de l'arrêté des « déchets de même nature non mélangés » ; or, l'expérience industrielle montre que l'on est difficilement dans ce cas de figure compte tenu des contraintes de désamiantage des bâtiments et équipements.

A l'article 3 de l'Arrêté il est précisé : «**Les déchets suivants ne sont pas autorisés à être stockés dans une installation de stockage de déchets non dangereux : tous les déchets dangereux au sens de l'article R. 541-8 du code de l'environnement, y compris les déchets dangereux des ménages collectés séparément, mais à l'exception des déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante.** »

Cet article indique que les déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante sont considérés par le législateur comme des déchets dangereux, puisqu'ils **constituent une exception**

à l'interdiction d'admission de déchets dangereux sur une installation de stockage de déchets non dangereux.

Le Chapitre Ier de cet Arrêté intitulé « *Dispositions spécifiques aux casiers dédiés aux déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante* », du titre V de l'Arrêté prescrit :

Article 39 :

« **Les déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante sont admis dans une installation de stockage de déchets non dangereux dans des casiers mono-déchets dédiés, sous réserve qu'ils ne contiennent pas de substance dangereuse autre que l'amiante.**

*Les casiers dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante ne sont pas soumis aux dispositions des articles 8 à 12, l'article 16-III, les articles 18, 19, 21, 22, 36 et 37. Si, sur la base d'une évaluation des risques pour l'environnement, l'exploitant établit que l'exploitation des casiers dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante n'entraîne aucun risque potentiel pour le sol, les eaux souterraines ou les eaux de surface, et l'air ambiant, les durées prescrites fixées aux articles 35 et 38 peuvent être **adaptées**.*

*La bande d'isolement de 200 mètres **peut être réduite à 100 mètres** pour les casiers de stockage recevant uniquement des déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante. »*

Compte tenu des hypothèses d'impacts sur les milieux des déchets contenant de l'amiante retenues dans le cadre de l'Arrêté, les prescriptions non applicables au stockage de déchets contenant de l'amiante sont notamment (hormis celles qui sont spécifiques aux déchets non dangereux) celles relatives à :

- l'étanchéité, le drainage et la stabilité des casiers,
- la collecte et le traitement des lixiviats et des rejets gazeux (biogaz)
- la période de post exploitation.

En effet, les articles 40 à 45 de l'Arrêté précisent pour ces thématiques des dispositions spécifiques aux déchets contenant de l'amiante.

On remarquera que la réduction de la bande d'isolement de 200 à 100 mètres prévue pour les déchets contenant de l'amiante est prescrite, selon le texte, en réponse à une volonté d'éviter un usage des terrains périphériques à l'installation incompatible avec in fine ses risques potentiels. Aussi, il est curieux que le législateur est prévue une bande d'isolement supérieure pour les déchets non dangereux (200 m) que pour les déchets contenant de l'amiante (100m) dans un contexte de renforcement des prescriptions applicables à la gestion de l'amiante pour la sécurité des personnes.

Article 40 :

« **Pour les casiers mono-déchets dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, la protection du sol, des eaux souterraines et de surface est assurée par une barrière géologique dite « barrière de sécurité passive » constituée du terrain naturel en l'état répondant aux critères suivants :**

- le fond des casiers de stockage présente une perméabilité inférieure à 1.10^{-7} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur ;

- les flancs des casiers de stockage présentent une perméabilité inférieure à 1.10^{-7} m/s sur au moins 0,5 mètre d'épaisseur.

La géométrie des flancs est déterminée de façon à assurer un coefficient de stabilité suffisant et à ne pas altérer l'efficacité de la barrière passive. [...]

*Si, sur la base d'une évaluation des risques pour l'environnement, il est établi que l'installation dédiée au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante n'entraîne aucun risque potentiel pour le sol, les eaux souterraines ou les eaux de surface, **les exigences** mentionnées aux alinéas précédents **peuvent être assouplies** en conséquence par arrêté préfectoral. »*

Les règles de conception des casiers des déchets contenant de l'amiante sont largement moins contraignantes que celles applicables aux déchets non dangereux qui prévoient :

« Le fond d'un casier présente, de haut en bas, une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur et une couche de perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-6} m/s sur au moins 5 mètres d'épaisseur ;

Les flancs d'un casier présentent une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 1 mètre d'épaisseur. »

Pour mémoire la réglementation applicable au stockage de déchets dangereux prévoit une barrière de sécurité passive d'une perméabilité inférieure ou égale à 1.10^{-9} m/s sur au moins 5 mètres d'épaisseur.

En outre, le texte prévoit une possibilité d'assouplissement supplémentaire de ces règles, s'il est établi que l'installation n'entraîne aucun risque potentiel pour le sol, les eaux souterraines ou les eaux de surface ; une possibilité troublante dans un contexte où les investigations se poursuivent au sein de la communauté scientifique pour qualifier plus précisément les impacts potentiels pour l'homme d'une contamination des nappes phréatiques, de l'eau potable par des fibres d'amiante.

Article 41 :

« Pour les déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, l'exploitant indique dans le registre des admissions, [...] :

- le numéro du ou des bordereaux de suivi de déchets d'amiante ;
- le nom et l'adresse de l'expéditeur initial, et le cas échéant son numéro SIRET ;
- le nom et l'adresse des installations dans lesquelles les déchets ont été préalablement entreposés ;
- l'identification du casier dans lequel les déchets ont été entreposés. »

On remarquera que la démarche registre pour les déchets contenant de l'amiante est similaire à celle prévue par la réglementation applicable à la gestion des déchets dangereux.

Article 42 :

« **Le déchargement, l'entreposage éventuel et le stockage des déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante sont organisés de manière à prévenir le risque d'envol de poussières d'amiante.**

A cette fin et conformément à la réglementation sur le travail, une zone de dépôt adaptée à ces déchets est aménagée. Elle est équipée, si nécessaire, d'un dispositif d'emballage permettant de conditionner les déchets des particuliers réceptionnés non emballés.

Ces déchets conditionnés en palettes, en racks ou en grands récipients pour vrac souples sont déchargés avec précaution à l'aide de moyens adaptés tel qu'un chariot élévateur, en veillant à prévenir une éventuelle libération de fibres. Les opérations de déversement direct au moyen d'une benne sont interdites.

Les déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante sont stockés avec leur conditionnement dans des casiers dédiés.

Un contrôle visuel des déchets est réalisé à l'entrée du site et lors du déchargement du camion. L'exploitant vérifie que le type de conditionnement utilisé (palettes, racks, grands récipients pour vrac...) permet de préserver l'intégrité de l'amiante durant sa manutention vers le casier et que l'étiquetage « amiante » imposé par le décret n° 88-466 du 28 avril 1988 est bien présent. **Les déchets ainsi conditionnés peuvent être admis sans essai.**

Lors de la présentation de déchets contenant de l'amiante, l'exploitant complète le bordereau de suivi de déchets d'amiante CERFA n° 11861. »

On remarquera que les dispositions énoncées témoignent d'une volonté de prise en compte du risque de dispersion des fibres d'amiante par envol alors que dans le cadre des règles de conception des alvéoles de stockage ce risque ne semble pas pris en compte au regard des dispositions proposées (barrière de sécurité passive moins contraignante que pour des déchets non dangereux, absence de barrière de protection active), bande d'isolement de 100 m.

En outre, compte tenu des activités de manipulation, conditionnement, emballage de déchets contenant de l'amiante prévues par le texte, les prescriptions à mettre en œuvre pour respecter la

réglementation sur le travail devraient être, dans la pratique, similaires à celles mises en œuvre lors d'un chantier de désamiantage. Cela n'est pas sans conséquence sur l'exploitation des installations de stockage de déchets concernées par cet arrêté.

La procédure d'admission des déchets contenant de l'amiante est similaire à celle prévue dans les textes réglementaires applicables à une admission dans une installation dédiée aux déchets dangereux (elle est détaillée à l'article 29 de l'Arrêté); sous un angle de maîtrise des impacts potentiels des déchets sur l'homme et l'environnement cette disposition est intéressante, mais pose la question des possibilités de réalisation pratiques de cette caractérisation des déchets sur une installation dédiée à la base à la prise en charge de déchets non dangereux (moyens humains et matériels de caractérisation physico chimiques).

En outre, au regard de cette exigence de certificat d'acceptation préalable, les prescriptions de conception des casiers de stockage de déchets contenant de l'amiante explicitées précédemment apparaissent d'autant plus surprenantes.

Article 43 :

« I. - Les déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, stockés dans les casiers dédiés, sont recouverts avant toute opération de régalaie à la fin de chaque jour de réception par des matériaux ou des déchets inertes de granulométrie adaptée à la prévention de toute dégradation de leur conditionnement. **L'épaisseur de recouvrement est supérieure à 20 centimètres.**
II. - **Une mesure de fibres d'amiante dans les bassins de stockage des eaux de ruissellement est réalisée tous les ans, afin de vérifier l'absence de dispersion de fibres d'amiante sur l'installation. En cas de détection de fibres d'amiante, l'exploitant prend les actions correctives appropriées dans un délai inférieur à six mois.** »

Article 44 :

« Pour les casiers mono-déchets dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, **la couverture finale comprendra une couche anti-érosion composée d'éléments minéraux grossiers, d'une épaisseur minimale d'un mètre.** »

Article 45 :

« I. - Le programme de suivi post-exploitation mentionné à l'article 37 est adapté pour les casiers mono-déchets dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante. Ce programme permet le respect des obligations suivantes :

- la clôture et la végétation présentes sur le site sont maintenues et entretenues ;
- le cas échéant l'article 22 concernant le contrôle des équipements de collecte et de traitement des lixiviats s'applique jusqu'au passage en gestion passive des lixiviats ;
- les articles 23, 24 et 25 (hors capacités d'accueil de déchets disponibles restantes) concernant respectivement la surveillance des rejets dans le milieu, la surveillance de la qualité des eaux souterraines et le relevé topographique s'appliquent durant toute la période ;
- le cas échéant la fréquence des contrôles prévue à ces articles est adaptée selon les fréquences suivantes :

- volume des lixiviats collectés : semestriel ;
- composition des lixiviats collectés : semestriel.

II. - **Pour les casiers dédiés au stockage de déchets de matériaux de construction contenant de l'amiante, lorsque le rapport de synthèse à dix ans de suivi post-exploitation montre qu'il n'y a pas d'évolution des paramètres de surveillance des milieux contrôlés, le préfet acte la fin de la période de post-exploitation** dans les formes prévues à l'article R. 512-31 du code de l'environnement. L'arrêté préfectoral prescrit les mesures de surveillance des milieux en appliquant l'article 38. »

Les prescriptions relatives à la couverture des casiers de déchets contenant de l'amiante sont elles aussi allégées par rapport à celles applicables aux déchets non dangereux ; cette position est cohérente vis-à-vis des prescriptions applicables à la constitution des fonds et flans de casiers de

l'arrêté mais semble pas adaptée aux prescriptions applicables en post exploitation et de surveillance des milieux en matière de suivi des fibres d'amiante dans les eaux de ruissellement.

En annexe au texte, on remarquera que les prescriptions d'analyse pour le suivi des impacts potentiels des installations de stockage de déchets non dangereux invitent à une adaptation du suivi à la réalité des effluents produits mais ne prescrit pas de paramètres et de protocoles pour le suivi d'une dispersion de fibres d'amiante dans le milieu :

« Annexe I - « **critères minimaux applicables aux rejets d'effluents liquides dans le milieu naturel** »

Annexe II -

1. *Données relatives aux rejets :*

En fonction de la composition des déchets stockés, des paramètres et substances supplémentaires peuvent être analysés. Ils doivent être précisés dans l'arrêté d'autorisation et refléter les caractéristiques des déchets en matière de lixiviation. »

2. *Surveillance des eaux souterraines :*

Les paramètres à analyser dans les échantillons prélevés doivent être déterminés en fonction des polluants susceptibles d'être contenus dans le lixiviat et de la qualité des eaux souterraines dans la région. »

➤ **Traitement thermique des déchets contenant de l'amiante**

L'Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux fixe les règles de conception et d'exploitation (ainsi que les seuils de rejet dans l'environnement des effluents aqueux ou gazeux) applicables aux procédés de traitement thermique des déchets contenant de l'amiante :

Article 1 - *"Les présentes règles s'appliquent aux installations **internes ou collectives d'incinération et de co-incinération et de vitrification traitant des déchets dangereux** définis à l'article R.541-8 du Code de l'Environnement. (...)"*

La définition (Article 2) des termes incinération et co-incinération permet de couvrir l'ensemble des typologies de traitement thermique qui peuvent être appliquées à des déchets contenant de l'amiante :

« *Définitions. - Pour l'application du présent arrêté, les définitions suivantes sont retenues :*

- *installation d'incinération : **tout équipement ou unité technique fixe ou mobile destiné spécifiquement au traitement thermique de déchets, avec ou sans récupération de la chaleur produite par la combustion. Le traitement thermique comprend l'incinération par oxydation ou tout autre procédé de traitement thermique tel que la pyrolyse, la gazéification ou le traitement plasmatique ;***

- *installation de co-incinération : une installation fixe ou mobile dont l'objectif essentiel est de produire de l'énergie ou des produits matériels et qui **utilise des déchets comme combustible habituel ou d'appoint ou dans laquelle les déchets sont soumis à un traitement thermique en vue de leur élimination.***

Si la co-incinération a lieu de telle manière que l'objectif essentiel de l'installation n'est pas de produire de l'énergie ou des produits matériels, mais plutôt d'appliquer aux déchets un traitement thermique, l'installation doit être considérée comme une installation d'incinération.

*Les deux précédentes définitions **couvrent le site et l'ensemble de l'installation** constitué par toutes les lignes d'incinération ou par les lignes de co-incinération, par les installations de réception, d'entreposage et de traitement préalable sur le site même des déchets ; ses systèmes d'alimentation en déchets, en combustible et en air ; la chaudière de récupération d'énergie, les installations de traitement des fumées ; sur le site, les installations de traitement ou d'entreposage des résidus et des eaux usées ; la cheminée ; les appareils et les systèmes de commande des opérations d'incinération et d'enregistrement et de surveillance des conditions d'incinération. »*

Les nouvelles voies technologiques de traitement de déchets contenant de l'amiante explicitées dans cette étude,

- soit constituent des opérations de traitement thermique concernées par l'Arrêté du 20 septembre 2002 précité,
- soit sont concernées par la rubrique de la nomenclature ICPE applicable aux installations de traitement des déchets dangereux et font l'objet au cas par cas d'une définition par les services de l'état des prescriptions qui leur sont applicables.

3.3. Analyse critique et sélection des brevets – matériaux fibreux en fin de vie contenant de l'amiante

3.3.1. Démarche d'identification des procédés

Méthodologie :

L'identification des brevets entrant dans le champ de l'étude a été réalisée en s'appuyant sur la base de l'OMPI (Organisation Mondiale pour la Propriété Intellectuelle).

Agence des Nations Unis regroupant 188 membres, l'OMPI recense l'ensemble des brevets déposés par ces pays et met à disposition une base de données (PATENTSCOPE Database) qui contient environ 37 millions de dossiers de brevets.

Les recherches ont été effectuées pour la période allant du 01/01/2004 à aujourd'hui, en utilisant des mots clés en Anglais.

Amiante

Le mot clé « Asbestos » donnant 7016 résultats, nous avons travaillé à partir d'expressions clés associant le mot Asbestos avec différents autres mots liés à la notion de déchet et/ou de traitement.

Mots clés	Résultats
Asbestos treatment	423
Asbestos detoxification	92
Asbestos Containing Waste	149
Asbestos recycling	34
Asbestos conversion	27

Figure 57 Tableau des mots clés de la recherche et leurs résultats

Cette recherche a permis d'identifier 725 brevets.

Parmi ces brevets, une première sélection a été réalisée en éliminant notamment :

- Les brevets doublons (certains brevets ressortent sous plusieurs mots-clés)
- Les brevets liés à une extension géographique (un même brevet déposé en premier lieu au Japon peut ensuite être déposé dans un autre pays ou au niveau Monde... etc). Dans ce cas, nous n'avons gardé que le brevet d'origine.
- Les brevets consacrés uniquement à la description des installations de traitement ou proposant simplement un traitement permettant de réduire le risque de libération de fibres avant une solution de stockage en ISDND.
- Les brevets n'ayant pas de liens avec notre étude (Ex : Brevets concernant des traitements médicaux de maladies liées à l'amiante)
- Les brevets sans liens directs avec notre étude :
- Brevets concernant la Conception et le Design des installations de traitement (partie thermo-mécanique)
- Brevet concernant les techniques de confinement, de contrôle et mesures d'empoussièrement, de conditionnement sur chantier ou de méthodes d'analyse.

- Brevets concernant la conception et le Design d'équipements permettant de réaliser des opérations de désamiantage ou des opérations connexes au désamiantage.

A l'issue de ce premier tri, **208 brevets** ont été retenus et ont été soumis à une analyse plus approfondie quantitative et qualitative pour aboutir à la sélection d'une dizaine de brevets ou procédés qui font l'objet d'une présentation plus détaillée.

L'analyse quantitative permet d'identifier les principaux champs de recherche d'une part ainsi que certains acteurs de la recherche qui par le nombre de brevets déposés semblent devoir être considérés avec une attention particulière.

L'analyse qualitative permet ensuite de sélectionner au sein des principaux champs de recherche, les brevets apparaissant les plus intéressants dans le cadre de l'étude.

Les brevets retenus respectent en particulier les critères principaux suivants :

- ✓ Application à tous types de déchets amiantés issus de chantier (flocages, amiantes ciment, amiante plâtre...),
- ✓ Tolérance vis-à-vis de pollutions organiques (pouvant provenir de graisses, solvants, peintures, colles.. mais aussi de la matrice ciment ayant subi une carbonatation par le CO₂ de l'air (altération de long terme du ciment qui transforme le Ca en CaCO₃),
- ✓ Objectif de destruction complète de la structure fibreuse de l'amiante,
- ✓ Valorisation des sous-produits issus du traitement

Et les critères secondaires suivants :

- ✓ Possibilité de scinder le procédé en 2 phases distinctes dans le temps et l'espace (Prétraitement sur chantier / traitement final en installation fixe),
- ✓ Etat d'avancement de la technologie (En privilégiant bien sur les procédés donnant lieu à un développement avancé).

Certain brevets seront étudiés de manière groupée. En effet, il apparaît que certains procédés ont été découpés en plusieurs étapes faisant chacune l'objet d'un dépôt de brevet. Lors de l'analyse les procédés sont abordés dans leur ensemble.

Et enfin, certains brevets dont l'inventeur et le déposant sont identiques sont en réalité des améliorations liées à un brevet antérieur. Dans ce cas également, seul le brevet le plus récent est étudié.

3.3.2. Analyse quantitative

3.3.2.1. Origine des déposants

Sur les 208 brevets pré-sélectionnés, il est intéressant de regarder l'origine des déposants :

Origine du déposant	Nb de brevet	% du total
USA	6	2,88%
Russie	1	0,48%
Corée du Sud	14	6,73%
Japon	170	81,17%
Chine	2	0,96%
Europe (France)	7	3,36%
Europe (Italie)	4	1,92%
Europe (Pologne)	3	1,44%
Europe(Germany)	1	0,48%
TOTAL	208	100,00%

Figure 58 Tableau statistique - Origine des brevets

De manière générale, la recherche japonaise est la plus productive sur le sujet et balaye l'ensemble du champ de recherche aussi bien sur les procédés de traitement thermique (torcha à plasma / four à ciment / micro ondes) que thermochimique (attaque acide / agent minéralisant / mélanges avec d'autres types de déchets...).

C'est en Corée du Sud qu'on retrouve ensuite le plus grand nombre de brevets. La moitié des brevets sont issus d'instituts de recherche ou de laboratoires universitaires. Il en est de même pour les brevets européens.

3.3.2.2. Concentration des brevets

Presque la moitié des brevets (94) ont été déposés par seulement 15 entités.

Parmi elles, 5 entreprises japonaises liées au secteur du bâtiment (construction, fabrication de ciment, granulats) ont déposé 61 brevets (*en italique*). En particulier, les cimentiers et notamment Les sociétés SUMITOMO OSAKA CEMENT avec 26 brevets déposés et TAIHEIYO CEMENT avec 15 brevets déposés. Ces brevets proposent divers procédés thermiques et thermochimiques utilisant un four à ciment.

	Pré-traitement	Chimique	Thermique	thermochimique	TOTAL
<i>SUMITOMO OSAKA CEMENT CO LTD.</i>	2			24	26
<i>TAIHEIYO CEMENT CORP</i>	2		5	4	11
<i>MITSUBISHI MATERIALS CORP</i>			1	10	11
<i>HAYASHI YOSHINOBU</i>	3			4	7
<i>A & A MATERIAL CORP</i>				6	6
INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE		1		4	5
STREET DESIGN CORP	4				4
DAIO KENSETSU			2	2	4
NICHIAS CORPORATION	2			1	3
SHIMIZU CORP	3				3
TAKARA PROTECT MATERIALS CO LTD	2			1	3
ARI TECHNOLOGIES INC				3	3
INDUSTRY FOUNDATION OF CHONNAM NATIONAL UNIVERSITY				3	3
NOZAWA CORP				3	3
ATON-HT S.A				2	2
					94

Figure 59 Tableau des procédés thermiques et thermochimiques utilisés

3.3.2.3. Historique des publications

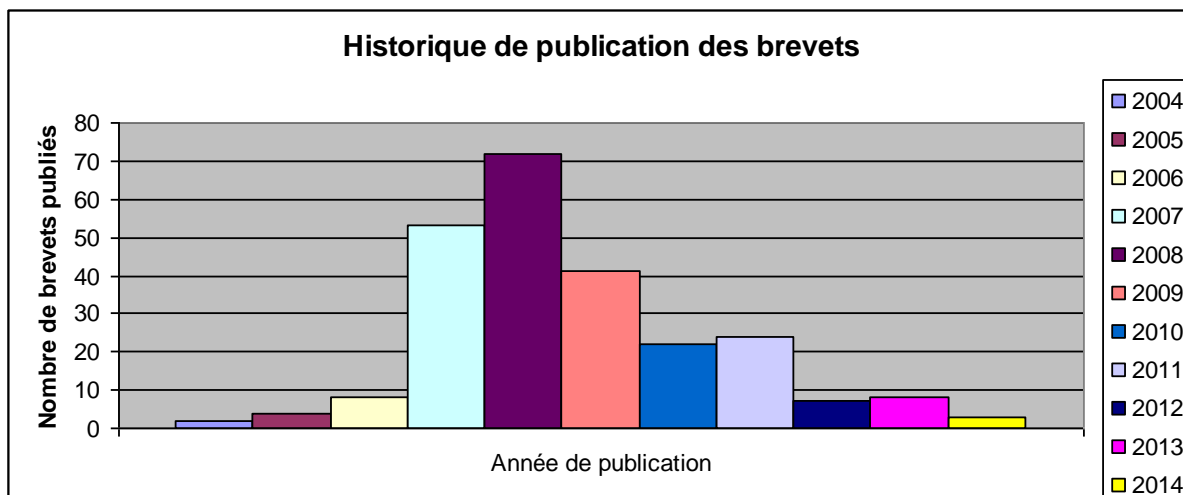


Figure 60 Historique de publication des brevets

On observe que les travaux de recherche sur les procédés de traitement de l'amiante sont très importants sur la période 2007 – 2011.

Concernant les procédés de traitement de l'amiante, l'ensemble des brevets entrant dans le champ de l'étude ont été identifiés. Une première analyse quantitative met en évidence une large prépondérance de la recherche japonaise sur le sujet ainsi qu'un pic des publications sur la période 2007-2011. La baisse significative des publications sur les années suivantes laisse penser que les principaux champs de recherche ont à ce jour été explorés.

3.3.2.4. Classification

Les 208 brevets considérés peuvent être classés selon 4 grandes familles :

- Pré-traitement (solidification / encapsulage) = 40
- Traitement thermique = 8
- Traitement chimique = 19
- Traitement thermo-chimique = 141

Au sein de ces grandes familles, ces brevets ont été classifiés selon un certain nombre de critères.

Le mode de classification d'un certain nombre de procédés est apparu de manière évidente :

- Les procédés de bases tels que par les traitements par voie acide, basique ou l'utilisation d'un agent minéralisant faisant référence à des champs de recherche bien identifiables,
- Les procédés très spécifiques tels que la carbonatation minérale ou l'oxydation hydrothermale.

En revanche, un certain nombre de procédés utilisant des réactifs tels que les composés chlorés, calciques, fluorés, phosphatés...etc et la combinaison de ceux-ci avec des effets qui se recoupent (tensio-actif, fondant, complexant de métaux...) obligent à faire un choix de classification subjectif.

Les critères de classement ci-dessous sont donc le reflet du choix des rédacteurs pour répondre à la difficulté de présenter la large diversité des procédés tout en évitant un inventaire à la Prévert.

Pré-traitement	divers (agents minéralisant, acide...)	40
ss-total		40
Chimique	acide à froid	6
	agent réducteur et broyeur à impact	2
ss-total		8
Thermique	fusion	7
	déshydratation	12
ss-total		19
Thermochimique	acide	50
	agent minéralisant	40
	fondant	26
	solution basique	5
	boues organiques	5
	carbonatation minérale	6
	méthode hydrothermale / eau supercritique	5
	CFC	3
	valorisation en Zéolite	1
ss-total		141
Total		208

Figure 61 Critères de classement des procédés

Cette première approche met en évidence les 2 principaux champs de recherche qui sont les traitements par voie acide d'une part et l'utilisation d'un agent minéralisant d'autre part.

Ces procédés étant utilisés en majorité aussi bien dans les phases de traitement que lors des phases de prétraitements sur chantier.

On peut souligner également le fait (qui n'apparaît pas dans le tableau précédent) que :

- Dans plus de 50 % des brevets basés sur une attaque acide, les déposants prévoient d'utiliser des additifs et notamment des fluorures.
- Dans plus de 50 % des brevets basés sur l'utilisation d'un agent minéralisant, c'est un silicate alcalin qui est préféré.

Enfin, dans le champ de recherche identifié sous le terme de « fondant », ce sont alors principalement des composés calciques (et très souvent la fluorine CaF_2) et/ou chlorés qui sont proposés.

3.3.2.5. Analyse qualitative

3.3.2.5.1. Pré-traitement (Solidification / encapsulage)

Les solutions proposées pour pré-traiter l'amiante peuvent poursuivre 2 objectifs distincts :

- Soit consolider l'amiante en place pour allonger sa durée de vie, sans objectif de dépose immédiate,
- Soit solidifier et encapsuler l'amiante dans l'objectif de faciliter sa dépose, son transport et sa manutention (la solidification permet d'une part de déposer de plus « gros morceaux » et d'autre part de limiter la libération de fibres).

Ce deuxième cas de figure retient l'attention car les méthodes et réactifs utilisés (acide / agents minéralisants...) sont les mêmes que pour les procédés de traitement.

Bien souvent, d'ailleurs, les déposants de ces brevets ont également déposé des brevets concernant le traitement ultérieur du déchet amianté comme le montre le tableau précédent.

Les processus chimiques en jeu dans ces brevets relatifs au pré-traitement sont similaires à ceux décrits dans les procédés de traitement utilisant les mêmes réactifs. De plus, un certain nombre de brevets décrivant des procédés thermo-chimiques prévoient des traitements en 2 phases distinctes dans le temps et l'espace. La première phase étant réalisée sur chantier (ce qui revient à un pré-traitement) et la seconde sur une installation fixe (traitement thermique).

Suite à cette analyse, il est apparu qu'il n'était pas nécessaire d'aller plus loin dans l'analyse des brevets spécifiquement consacrés à des procédés de pré-traitement.

3.3.2.5.2. Procédés chimiques : traitement acide à froid.

6 brevets proposent un traitement acide à froid.

5 d'entre eux sont japonais et proposent l'utilisation de différents acides (HF / HCl / acides organiques) parfois associés avec des agents oxydants (H₂O₂ / TiO₂). Tous proposent une récupération des ions métalliques passés en solution.

Le 6^{ème} brevet est déposé par Ghislain / Delmas de l'INP de Toulouse. Ce brevet a été complété par un second brevet décrivant un procédé similaire mais à chaud (90°C) afin d'améliorer la cinétique de la réaction.

Ce second brevet fait l'objet actuellement d'un développement par la société NEO-ECO Recycling.

Comme ce procédé sera étudié en détail dans le cadre de l'étude, il ne semble pas nécessaire d'approfondir l'étude des autres brevets dans ce champ de recherche.

Le projet VALMIANTE soutenu par l'ADEME (et qui ne fait l'objet d'un dépôt de brevet) entre également dans ce champ et sera détaillé plus loin.

3.3.2.5.3. Traitement par agent réducteur et broyeur à impact

2 brevets sont déposés au Japon utilisant la technologie d'un broyeur type broyeur planétaire à bille. Ce type de broyeurs est utilisé en particulier dans le domaine de la fabrication de nano particules.

Les forces centrifuges extrêmement importantes dans les broyeurs planétaires à billes engendrent une très grande énergie de broyage et permettent l'extension (jusqu'à la rupture éventuelle) des liaisons atomiques au sein de l'amiante.

Ce procédé mécanique peut effectivement aboutir à la destruction de la structure fibreuse de l'amiante. En revanche, il s'agit ici d'un processus de laboratoire. Les broyeurs de ce type ont de faibles capacités et ne peuvent convenir à une solution de traitement à une échelle industrielle.

3.3.2.5.4. Procédés Thermiques :

17 brevets proposent des traitements thermiques uniquement, dont 7 par fusion ($T^{\circ} > 1500^{\circ}\text{C}$), les autres par déshydratation.

3.3.2.5.4.1.1. Fusion

Sur les 7 brevets, un brevet a la particularité de proposer une fusion dans un four qui concentre la lumière solaire afin de produire des hautes températures. Il existe très peu de grands fours solaires (France, Ouzbékistan, Chine) ayant la capacité de traiter des volumes importants.

Ces installations n'ont pas de vocation industrielle et sont exclusivement utilisées à des fins de recherche. Ce brevet ne présente donc pas d'intérêt dans le cadre de l'étude.



Figure 62 Le four solaire d'Odeilo - France

Les 6 autres brevets proposent de mélanger l'amiante avec divers déchets et/ou combustibles et chauffer à des températures de l'ordre de 1500°C à 2000°C .

Ces brevets en eux-mêmes ne présentent pas un très grand intérêt, en dehors d'éventuelles solutions concernant la gestion des poussières (conditionnement, broyage en dépression) qui doivent quoiqu'il en soit être re-pensées pour chaque installation.

Au-delà du procédé développé par INERTAM, et dans la perspective de trouver des solutions industrielles de traitement des déchets amiantés, la question est plutôt d'identifier les installations de traitement thermique de déchets à haute température existantes (notamment les procédés de pyrolyse / gazéification) et voir dans quelle mesure les exploitants y traitent ou peuvent envisager d'y traiter des déchets amiantés.

Le groupement Japonais NSENGI (Nippon Steel & Sumikin Engineering) a notamment développé le procédé DMS (Direct Melting System) qui est une technologie basée sur la gazéification des déchets.

Cette technologie est largement répandue au Japon avec une quarantaine d'incinérateurs en fonctionnement dont les premiers ont été mis en œuvre il y a 40 ans. Les températures de traitement sont de l'ordre de 1800°C donc suffisantes en théorie pour atteindre le point de fusion de l'amiante et dénaturer sa structure fibreuse.

Le groupement possède une filiale en Allemagne (Steinmuller babcock environment) et tente d'implanter le procédé en Europe sans succès jusqu'ici.

M. Nobuhiro Tanigaki, responsable technique basé à Dusseldorf affirme qu'il est possible de traiter des déchets amiantés en mélange avec des ordures ménagères ou des déchets industriels solides (co-gazéification)

Un essai réalisé dans un des incinérateurs au Japon a fait l'objet d'une publication en 2013 (Demonstration study of high temperature melting for asbestos-containing waste - Journal of Material Cycles and Wastes Management – Janvier 2013 – Vol 15 – Issue 1 – p 25-36). Il s'agit du traitement de déchets amiantés en mélange avec des ordures ménagères.

Les conclusions montrent que l'amiante a été entièrement dénaturée. Les mesures d'empoussièrément au niveau des fumées et à divers points de l'usine restent dans les normes exigées par le ministère de l'environnement Japonais.

3.3.2.5.4.1.2. Déshydratation

Concernant les 12 brevets proposant un traitement thermique par déshydratation, 5 d'entre eux retiennent notre attention, l'un proposé par MCT Establishment (Liechenstien) et les 4 autres proposés par la société Japonaise TAIHEIYO CEMENT CORP, bien qu'aucun d'entre eux ne fasse l'objet d'une extension mondiale (chacun des brevets détaillant une partie ou une variante d'un même procédé consistant à déshydrater un déchet amianté en utilisant un four à ciment).

Nous avons sollicité plusieurs fois ces entreprises depuis Mars 2015 sans réponse de leur part, ce qui ne nous permettra pas d'approfondir l'étude de ces procédés.

D'après les informations disponibles, MCT est en recherche de partenaire financier / industriel pour implanter une usine en Europe.

3.3.2.5.4.2. Procédés Thermochimiques

Les principaux champs de recherche dans le domaine des procédés thermochimiques ont été identifiés précédemment.

Avec 50 brevets basés sur une attaque acide et 40 brevets basés sur l'utilisation d'un agent minéralisant, ces 2 champs de recherche représentent déjà plus de 60% des brevets déposés.

Nombre d'entre eux utilisent des additifs divers et très souvent des fluorures.

3.3.3. Analyse critique des brevets sélectionnés

Les procédés paraissant les plus intéressants à étudier plus en détail au regard des critères fixés dans le cadre de l'étude sont les suivants :

Procédés	Famille	Méthode	Brevets	Tous déchets amiantés	Tolérance pollution organique	Objectif destruction complète	Valorisation	Procédé 2 phases	Avancement
<i>MCT Establishment</i>	T	Déshydratation	1	Oui	Oui	Oui	Faible	Non	N/A
<i>TAIHEIYO CEMENT CORP</i>	T	Déshydratation	5	Oui	Oui	Oui	Faible	Non	N/A
INERTAM	T	Fusion / vitrification	N/A	Oui	Oui	Oui	Faible	Non	Industriel
Direct Melting System / Thermoselect	T	Fusion (Gazeification)	N/A	Oui	Oui	Oui	Faible	Non	N/A
<i>SUMITOMO OSAKA CEMENT</i>	TC	Agent minéralisant / acide	24 (dont 2 monde)	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	N/A
ARI-TECHNOLOGIES	TC	Agent minéralisant	3	Oui	Oui	Oui	Faible	Oui	Industriel
ATON HT	TC	Agent minéralisant	2 (dont 1 monde)	Oui	Oui	Oui	Faible	Oui	Pilote Industriel
TECHME / IRAM	TC	Agent minéralisant	1 (Monde)	Oui	Oui	Oui	Non envisagée	Non envisagée	Pilote labo
NEO-ECO RECYCLING	TC	Acide	2 (Monde)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Pilote labo
Carpena / Lacout	TC	Acide	3 (Monde)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Recherche partenaire
VALMIANTE	TC	Acide	Non déposé	Non	Oui	Oui	Oui	N/A	Recherche

Figure 63 Tableau d'analyse des brevets sélectionnés

NB :

1. *En italique figurent les procédés qui paraissent intéressants à étudier plus en détail mais pour lesquels il n'a pas pu être établi un contact avec les sociétés concernés.*
2. Concernant le procédé DMS (Direct Melting System) il a été présenté dans le paragraphe précédent sur les procédés thermiques.

3.3.3.1. Procédé SUMITOMO OSAKA CEMENT Co Ltd

L'entreprise Japonaise SUMITOMO OSAKA CEMENT Co Ltd a déposé 24 brevets qui envisagent tous de valoriser l'amiante dans des fours à ciment comme matière première pour la fabrication de clinker.

Ces brevets balayent une large partie des champs de recherche : traitement par voie acide, en solution basique, avec additifs divers tels que fondants, complexant de métaux, tensio-actifs avec plusieurs variantes (utilisation d'ultrasons) et procédés mécaniques (broyage, malaxage.etc).

Deux brevets très complets font l'objet d'une extension à l'échelle mondiale.

Il semblait intéressant, en rapport avec cette entreprise, de tenter d'approfondir l'étude dans une approche globale des procédés permettant de valoriser l'amiante en matière première pour l'industrie cimentière.

La tentative de prise de contact direct avec cette entreprise Japonaise (ainsi que l'entreprise TAIHEIYO CEMENT située également au Japon) fait suite d'autres tentatives qui sont restés infructueuses :

- UBIFRANCE Japon (par l'intermédiaire de la mission Franco Japonaise au sein du ministère de l'économie)
- Maison Franco Japonaise à Tokyo
- Mission économique de l'ambassade de France à Tokyo (Sébastien Codina)
- Antenne du CNRS à Tokyo

Sur le principe de valoriser les déchets amiantés dans l'industrie cimentière et notamment dans la fabrication de clinker, l'industrie française, l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH) a été interrogée.

Même si la quantité de brevets déposés par des cimentiers japonais laisse penser qu'il est possible de mettre en œuvre un procédé de traitement industrialisé, les cimentiers français n'envisagent pas à ce stade d'étudier le sujet. Ceci car ils sont déjà sollicités pour introduire toute sorte de déchets dans les fours à ciment (CSR, Farines animales...).

De ce fait les déchets amiantés qui apparaissent à la fois compliqués à traiter sur le plan technique (mise au point du procédé, gestion des poussières, tests, etc) et problématique sur le plan de l'acceptation sociale (risques santé pour le personnel et pour les riverains) ne suscitent pas l'intérêt des industriels.

3.3.3.2. Procédé TECHME

Ce procédé est développé sur la base d'un brevet français et utilise là aussi un agent minéralisant.

Un premier pilote a été réalisé par la société ABK machinerie et les tests ont démontré une destruction à 99,8% de la structure fibreuse. Ces résultats certes encourageants restent insuffisant vis-à-vis de la réglementation qui exige l'absence totale de fibres résiduelles pour considéré le déchet comme non amianté.

La société ICAM qui a racheté le brevet a décidé de poursuivre les essais et vient de conclure un partenariat avec RAMERY et ABK pour reprendre des tests en améliorant le pilote.

La présence d'amiante résiduelle dans les essais précédents peuvent provenir soit d'un environnement de travail inadapté (les essais ont été fait en zone rouge – présence de fibres d'amiante dans l'air qui aurait contaminé le process), soit par la formation de bulles lors de la phase de malaxage qui emprisonnent des fibres et les protègent de l'action des réactifs.

3.3.3.3. Procédé Carpena / Lacout (CNRS)

Ces 2 chercheurs attachés au CNRS et à l'université Aix Marseille 3 ont déposé 3 brevets qui proposent de détruire la structure fibreuse de l'amiante sur la base d'une attaque acide à chaud.

Sur le principe, le procédé est assez similaire à ce que développe actuellement Neo-Eco Recycling mais a la particularité de proposer une valorisation variée (silice pure, rabdophane, apatite).

Les déposants recherchent actuellement des partenaires pour développer un pilote et faire des essais.

3.3.3.4. Procédé ARI-TECHNOLOGIES

3.3.3.4.1. Historique et présentation

La société ARI Technologies Inc est une société américaine dont le fondateur Gerald Hermanson a mis au point dès le début des années 90, une technologie permettant de traiter des déchets amiantés par conversion thermochimique.

Le procédé permet également de détruire les polluants organiques dont le PCB à 99,9999 % et de stabiliser les métaux lourds dans les produits secondaires par le biais de liaisons moléculaires.

Suite à un appel d'offre lancé en 1994 par le Ministère de l'énergie (DOE – US Department of Energy) Un premier pilote industriel mobile avec une capacité de traitement de 10 tonnes /jour a été mis en œuvre en 1997 en conditions réelles.

Lors de ce chantier qui a duré 9 mois, le procédé a été contrôlé selon le protocole du Ministère de l'environnement (US-EPA – Norme 40 CFR 61.155) pendant une durée continue de 90 jours. A la suite de cette opération, l'EPA a conclu que les déchets amiantés étaient totalement inertés et pouvaient être valorisés en sous couche routière. A la suite de cette opération, l'EPA a approuvé le procédé et délivré à ARI technologies un permis d'exploitation.

En 2000, ARI technologies réalise un nouveau pilote industriel fixe d'une capacité de 15 tonnes / jour pour traiter des déchets amiantés contenant également des PCB (Opération Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington). A la suite de cette opération, l'US-EPA délivre à nouveau un permis d'exploiter pour cette technologie de traitement de déchets amiantés pollués contenant des PCB en concluant que les produits issus du traitement sont des déchets non dangereux.

Plusieurs autres réalisations pour différentes entités américaines (Ministère de l'Energie, de la Défense...etc) ont été conduites au cours des années 2000 (en unité fixe ou mobile) avec une mise en œuvre de contrôles sévères qui ont chaque fois permis de conclure que le niveau d'émission de fibres restaient en dessous des normes exigibles, que les déchets amiantés étaient totalement inertés et pouvaient être considérés comme un déchet non dangereux et valorisable.

3.3.3.4.2. Référence des brevets

Le procédé est protégé par 2 brevets déposés par ARI Technologies (Dale Timmons).

- WO 2010039737 : « Système et procédé pour le traitement de l'amiante » (publié le 08/04/2010)
- WO 2007005855 : « Système et procédé pour accélérer la transformation de l'amiante dans le processus de transformation minéralogique » (Publié le 11/07/2007).

L'utilisation d'un agent minéralisant avait fait l'objet d'un premier brevet déposé en 1990 qui est tombé dans le domaine public.

Le dépôt des 2 brevets cités a permis de breveter l'ensemble du process et ainsi de protéger son inventeur. Au delà des informations données par les brevets, Dale Timmons affirme que c'est le savoir faire développé à travers les nombreuses expérimentations en pilote industriel qui est le principal actif intellectuel.

Malgré ces essais concluants, ARI technologies n'a pas réussi à développer son activité aux Etats-Unis ou les solutions d'enfouissement sont abondantes et peu chères.

La société et ses brevets ont été rachetés début 2015 par WINDSOR INTEGRATED SERVICE GROUP(WISG)

La société Windsor Waste Management (WWM) qui appartient à WISG est un des leaders au Royaume Uni de l'élimination des déchets amiantés (15.000 tonnes / an)

L'entreprise prévoit la construction d'une usine de traitement d'une capacité de 50 tonnes / jour dans le Sud de l'Angleterre d'ici fin 2016.

3.3.3.4.3. Description du procédé (installation fixe)

Le procédé utilise un agent minéralisant. Après une phase de broyage et malaxage, le mélange est ensuite chauffé à une température de l'ordre de 1200°C. Les fibres d'amiante sont alors reminéralisées et l'amiante transformée en roches silicatées telles que la wollastonite, diopside et olivine.

L'ensemble du process est scindé en 4 phases qui peuvent être modifiées de manière indépendantes en fonction du type de déchet amianté :

- Le système d'alimentation qui comprend les tapis d'alimentation, un broyeur, un malaxeur, une trémie et un système qui compacte le déchet sous forme de brique et l'introduit dans le four à foyer rotatif (Rotary Hearth Furnace)
- Le convertisseur à foyer rotatif. Le mix est poussé dans le foyer et y est soumis à un traitement thermique d'environ 20 minutes à 1200°C. Le déchet sort après une rotation dans le four. Cette technologie du four à foyer rotatif est largement utilisée par l'industrie sidérurgique avec des capacités allant jusqu'à 300.000 tonnes / an. Le four peut être alimenté par un combustible fossile (gaz naturel, propane, kérosène) ou à l'électricité.
- Le système de traitement des fumées qui comprend un refroidisseur, un module d'oxydation thermique (traitement des émissions de composés organique volatils) un épurateur caustique (fumées acides provenant par exemple de la combustion de dalles PVC), un système de séparation de l'eau et une filtration haute efficacité (HEPA).
- Le système consistant à sortir les produits du four, les refroidir avec de l'eau, et les placer dans des contenants en attente des tests de vérification.

Tous types d'amiante (serpentine, amphiboles, etc) sont susceptibles d'être traitées. Mais aussi sous ses différentes formes en terme de déchets amiantés (flocages, liée avec du plâtre, du ciment,

plaques fibro-ciment, etc). Les températures de traitement permettent également de détruire les pollutions organiques (PCB par exemple).

Phase d'alimentation

Les déchets amiantés arrivent conditionnés en sacs double épaisseur. Les sacs fermés sont placés sur les tapis d'alimentation par des manutentionnaires ou de manière automatique si les sacs sont ouverts.

L'ensemble de la zone de préparation des déchets est maintenu en dépression pour empêcher les fibres d'être libérées. L'environnement de travail est soumis à un contrôle de l'air, la concentration de fibre doit rester inférieure à 0,1 fibre / cm³

Les sacs sont introduits dans le broyeur (granulométrie < 50 mm). L'agent minéralisant est également introduit pendant la phase de broyage pour faciliter l'imprégnation des déchets amiantés. L'agent minéralisant utilisé est à base de silicate de sodium ou de borax (voir chapeau technique)

A l'issue de la phase de broyage et de malaxage, le matériau a une faible densité.

Le compactage du déchet amianté permet d'augmenter sa densité. Ceci apporte plusieurs avantages: la possibilité d'augmenter le poids des déchets introduits dans le four et surtout une meilleure conductivité thermique au sein du déchet, ce qui permet de réduire le temps du traitement thermique.

Phase de traitement dans le four à foyer rotatif

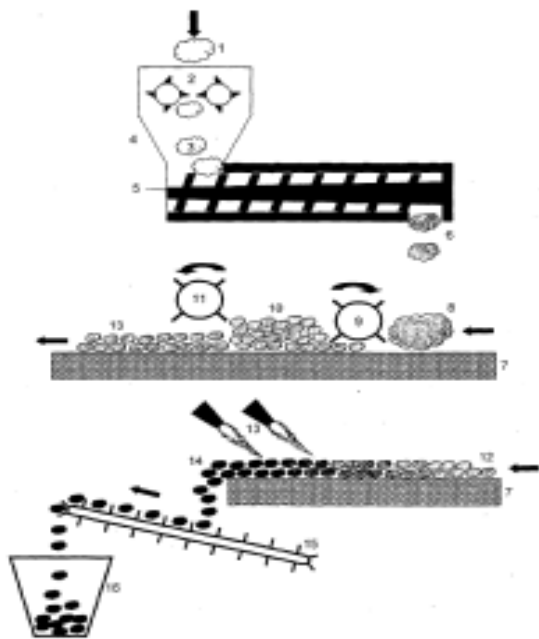
Les déchets introduits dans le four après pressage peuvent avoir des tailles différentes ce qui entraîne des durées de traitement hétérogènes. Il est donc prévu un système utilisant deux arbres à couteaux tournant en sens contraire sur le sol du four où se trouve les déchets. Ce système va permettre à la fois de fragmenter les déchets selon une granulométrie homogène, les étaler et les mélanger pendant cette phase thermique pour une exposition uniforme.

On remarque que les éventuelles fibres d'amiante libérées à l'intérieur du four sont immédiatement converties en minéral non asbestiforme du fait de leur grande surface de contact (fibres volatiles) ainsi que de la température élevée dans l'enceinte du four. Les tests pratiqués n'ont jamais détecté la présence de fibre en aval du four.

Phase de sortie et de refroidissement :

A l'origine, le procédé prévoyait un refroidissement rapide dans un bain d'eau. Mais l'expérience a montré qu'un refroidissement plus lent permet au processus de conversion thermochimique de continuer au delà de la sortie du four. Outre l'avantage de réduire le temps de présence dans le four, cette méthode permet également d'économiser de l'eau dans la phase de refroidissement et donc les problèmes liés à la gestion des eaux de process.

En revanche cela nécessite de mettre en place des outils spécifiques pour la manutention des matières restant à haute température.



1. Système d'alimentation, broyage, malaxage, compactage

2. Introduction dans le four, fragmentation et homogénéisation

3. Traitement Thermique

4. Sortie et refroidissement

Figure 64 Schéma de principe du procédé ARI Technologies

Le procédé est continu.

Les produits obtenus en sortie sont des roches silicatées de type Wollastonite, Diopside, autres pyroxènes et Olivine. Les roches de type asbestiformes fibreuses ont été entièrement éliminées.

En fin de procédé, les déchets amiantés ont subi une réduction de 50 % de leur poids. Ceci est principalement dû à l'élimination de l'eau (eau structurale contenues dans l'amiante ainsi que l'eau ayant servi à humidifier l'amiante lors de la dépose) et des composants organiques.

Dans le cas de l'amiante ciment, on obtient également une réduction de volume d'environ 50% (perte d'eau structurale, augmentation de densité). 90 % dans le cas du traitement d'amiante friable (Flocage, calorifugeage).

A noter que l'agent minéralisant utilisé compte pour <1% dans le poids du déchet final.

L'ensemble des process utilisés (broyage, compactage, four à foyer rotatif, traitement des fumées, manutention de matières chaudes.. etc) sont opérationnels et maîtrisés sur le plan technique et industriel.

De plus, lors de tous les essais réalisés avec les pilotes industriels,

- Les tests pratiqués en sortie de process (Analyse au microscope électronique en transmission – TEM ou par DRX) ne détectent aucune fibre résiduelle.
- Les essais de lixiviation montrent des teneurs en métaux lourds de 10 à 100 fois inférieures aux normes admissibles aux Etats unis et au Royaume Uni.
- Les mesures d'empoussièrement dans les différentes parties du process restent inférieures à 1f / cm³

Les nombreux essais en pilote industriel ont été concluants et ont permis à ARI technologies de disposer:

- D'une autorisation d'exploiter par le Ministère de l'Environnement aux Etats Unis (US-EPA)
- D'un classement (Tacoma Pierce County Health Department – US) des produits issus du traitement en déchets non dangereux et la possibilité d'être recyclés comme granulats (pour sous couche routière)
- D'une mention dans les BAT (Best Available Technologies) concernant les procédés industriels de traitement des déchets (EC IPPC - Aout 2006)

Sur le plan technique et industriel, le procédé ARI technologies apparaît donc maîtrisé et permettant de détruire la dangerosité des déchets amiantés de manière définitive.

3.3.3.4.4. Données économiques

WISG et ARI Technologies n'ont pas souhaité communiquer d'informations concernant la viabilité économique du process.

Cependant, le document d'Aout 2006 présentant les BAT concernant le traitement de déchets industriels fait une estimation des coûts pour une unité de capacité de 37 tonnes / jour.

Investissement : 3 Mi USD

Coût commercial : 175 à 225 USD / tonne

Les trois contributeurs les plus importants au coût global sont le combustible, l'équipement et la main-d'œuvre.

Le combustible compte pour 36 % du coût total, l'équipement pour 30 % et la main d'œuvre pour environ 22 %. D'autres éléments tels que les réactifs, l'entretien, l'eau, l'électricité, l'équipement de protection et les filtres comptent pour les 12 % restant du coût global.

Avec une unité plus importante, les coûts de fonctionnement peuvent être réduits grâce à des économies d'échelle.

Ces estimations s'appuient sur les hypothèses suivantes :

- description du système : système 37 tonnes/jour, chauffage direct avec récupération thermique, avec épurateur-laveur à la chaux sèche
- dépenses d'infrastructure : basées sur une période d'amortissement du capital de 7 ans à un taux d'amortissement réel de 3,0 % (2002)
- conditions d'exploitation : 24 h/24, efficacité d'exploitation de 80 %, équipes de 9 personnes
- les frais comportent le combustible (kérosène), l'électricité, les produits chimiques du procédé, l'équipement de protection individuel, l'entretien régulier et les filtres HEPA
- les frais généraux et les bénéfices sont également inclus.
- l'élimination des matières traitées n'est pas incluse
- le transport vers l'installation de traitement n'est pas inclus.

A noter :

La présence de Polyéthylène (sacs, déchets plastiques) contribue à la production de chaleur dans le foyer (jusqu'à 20 % d'économie d'énergie).

Le procédé utilise environ 2 litres d'agent minéralisant pour 25 kg de déchets amiantés.

Les produits issus du process étant valorisables en sous-couche routière, on peut envisager un cout nul pour leur élimination.

En terme de maintenance, en l'absence de chocs thermiques ou de corrosion non souhaitée, le revêtement en céramique réfractaire du four a une durée de vie de 5 à 10 ans. La présence éventuelle de déchets halogénés est à prendre en considération car entraîne des phénomènes de corrosion du four qui augmentent les couts de maintenance.

Le procédé développé par ARI TECHNOLOGIES est le plus avancé puisqu'il a été validé par plusieurs opérations en pilote industriel et une utilisation commerciale (même limitée).

Le projet de WISG de construire une unité de capacité de 50 tonnes / jours en Angleterre en 2016 est à suivre. Cette unité serait la première alternative en Europe pour un traitement définitif de déchets amiantés à un cout comparable à celui de l'élimination en centre de stockage.

3.3.3.5. Procédé ATON HT

ATON-HT SA est une société Polonaise fondée en 2005. Elle concentre son activité sur le développement de procédés concernant le traitement de déchets dangereux. Technologies pour lesquelles elle détient des brevets. La spécificité de tous les procédés est d'utiliser des micro-ondes comme source d'énergie pour le traitement thermique de déchets.

Concernant le traitement de déchets amiantés, le procédé est protégé par 1 brevet déposé par ATON-HT (Ryszard Parosa).

3.3.3.5.1. Historique

Le procédé propose de traiter les déchets amiantés issus de démolition ainsi que les autres FMA.

Suite à des essais en laboratoire concluants, qui ont permis de valider l'agent minéralisant ainsi que les temps de traitement, ATON-HT a construit un pilote industriel d'une capacité de 200 kg /h qui associe un module pour le traitement thermique (ATON-HR 200 reactor) avec un module de traitement des fumées (Microwave Oxydation System Reactor). Chaque module étant installé dans un container maritime standard (20 pieds) et pouvant être déplacé directement sur chantier.

Ce pilote a été mis en œuvre sur un chantier de déconstruction en Pologne mené par la société Jacek Sroka (chantier de Stradomia Wierzchnia - 2013)

Ce test a pu être réalisé dans le cadre d'une autorisation spéciale de la part des autorités locales de Wroclaw avec un protocole imposant vêtements de protection, mesures de contrôle de l'air ($< 1 \text{ f} / \text{cm}^3$), contrôle des produits en sortie en accord avec les directives européennes (83/477 ; 98/24, 89/391, 92/57, 98/24 et 2004/37),

Le test a permis de traiter les éléments d'amiante ciment (toiture type éternit) ainsi que les laines de roches utilisées en isolation.

Les mesures d'empoussièrément ainsi que les tests sur le produit final (DRX / TEM) ont permis de conclure que le procédé permet effectivement de détruire la nature fibreuse de l'amiante sans libération de fibres dans l'environnement de travail hors de la zone de traitement.

Un autre test a été mis en œuvre à Pamplona (Espagne) en 2013, sur une ligne de production de laine minérale de l'entreprise ROCKWOOL. Le but du test étant de pouvoir traiter des déchets de production pollués par des composants organiques (résines, colles,..) afin de les ré-introduire dans le process de production.

Le test a duré 2 semaines et a permis de traiter 25 tonnes de déchets de production. Les produits en sortie ont ensuite été mélangés avec du ciment. Les blocs de ciment ainsi formés sont ensuite fondus pour fabriquer à nouveau de la laine de roche.

La réalisation de ces essais avec pilote industriel a donné lieu à de nouvelles améliorations concernant le système d'alimentation, un système de préchauffage et la construction d'une unité compacte rassemblant le MOS reactor et le ATON HR 200.

Ces innovations doivent faire l'objet du dépôt d'un nouveau brevet actuellement en préparation.

Un premier contact avec M. PAROSA en 2014 a permis de réunir l'ensemble des informations techniques nécessaires à l'analyse du procédé. Depuis, malgré d'autres sollicitations, il n'a pas été possible de reprendre contact avec ATON HT.

La société était-elle en contact avec SITA Allemagne (Manheim) et CMS (VINCI-France) pour réaliser de nouveaux tests. Ce point n'a pas pu être vérifié.

3.3.3.5.2. Référence du brevet

WO 2007053046 : « Procédé et appareil de traitement de matériaux amiantés » (publié le 10/05/2007)

3.3.3.5.3. Description du procédé

Le procédé peut-être détaillé en 4 phases :

Préparation et introduction dans le réacteur ATON HR-200

Dans cette première phase, le déchet est broyé selon une granulométrie < 2cm. Le broyat est ensuite malaxé avec un agent minéralisant (silicate de sodium / borax)

L'ensemble du process est réalisé dans un environnement hermétique pour prévenir la libération de fibres.

Les déchets sont introduits conditionnés en sacs polyéthylène mais le système d'alimentation n'est pas détaillé.

Traitement thermique

Le déchet broyé et mélangé avec l'agent minéralisant est introduit par un convoyeur dans le réacteur (HR-200).

Le réacteur est constitué d'un cylindre en céramique (tambour) en rotation sur son axe horizontal (pour assurer l'homogénéité des déchets traités et réduire le temps d'exposition). Le cylindre est équipé de plusieurs générateurs qui concentrent les micro-ondes sur le matériau à traiter.

Les fréquences utilisées sont de 2,45 GHz et les températures obtenues de l'ordre de 900 à 1000°C

Les déchets avancent le long du cylindre par gravitation.

Une fois traités, les déchets amiantés sortent du tambour à travers un broyeur et passent en phase de refroidissement alors que les fumées sont envoyées vers le MOS pour être traitées.

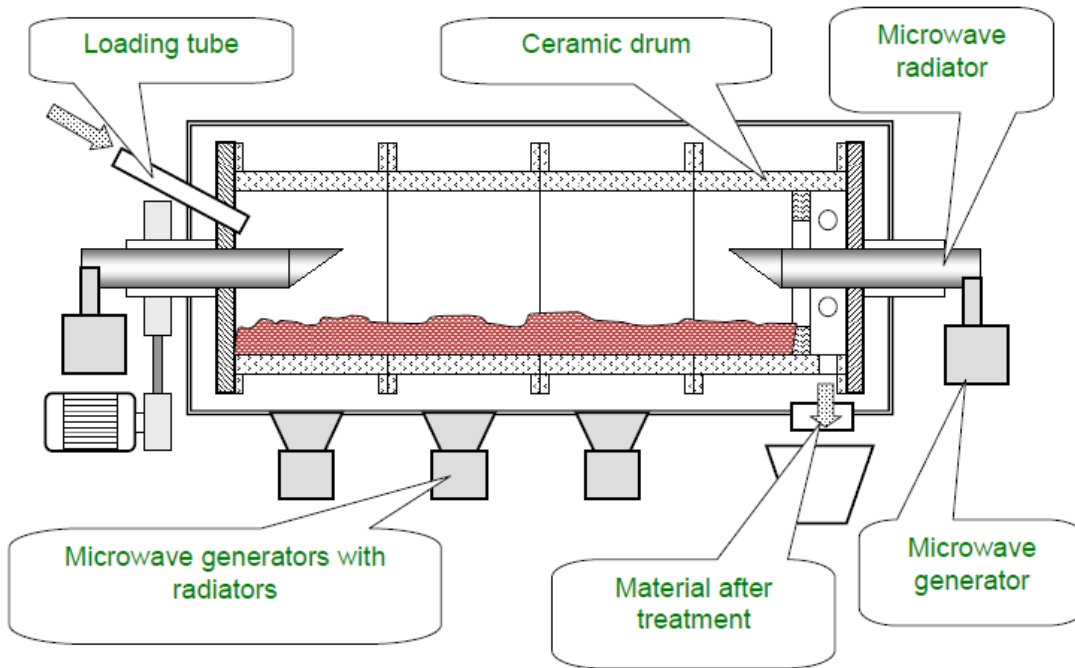


Figure 65 Schéma de principe du réacteur HR 200

Traitement des fumées (MOS reactor)

Le réacteur est constituée d'une chambre de combustion pleine d'éléments en céramique et munie de générateur de micro-ondes.

Les fumées traversent la chambre chauffée entre 1000 et 1200 °C et sont purifiées par oxydation de toute pollution organique.

Les éventuelles fibres d'amiante résiduelles sont également neutralisées.

Les gaz sont entraînés dans une turbulence au sein du réacteur, ce qui allonge leur temps de présence dans le réacteur.

Les gaz sont ensuite refroidis. L'énergie récupérée peut être réintégrée dans le process.

Le MOS fait l'objet d'un dépôt de brevet spécifique et peut être utilisé séparément pour toute application nécessitant la purification de gaz (destruction de polluants organiques).

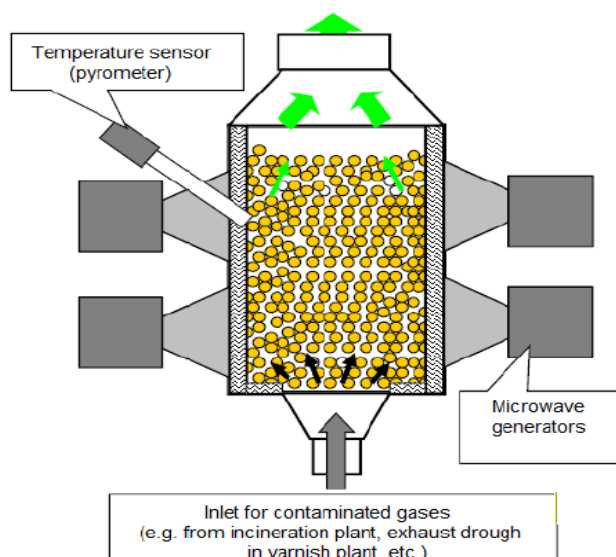


Figure 66 Schéma de principe du MOS

Refroidissement

Les produits sortie en sortie de traitement sont stockés en contenant et subissent un refroidissement lent.

Les produits obtenus sont valorisables en sous couche routière ou peuvent être réintroduits après broyage comme charge dans du béton.

Dans le cas d'amiante ciment, le produit obtenu peut être recyclé en le mélangeant à du ciment portland

Le procédé peut théoriquement fonctionner en continu en ajustant les capacités des différents éléments. Ce n'est pas le cas du pilote industriel.

3.3.3.5.4. Données économiques

Cette estimation de couts est donnée par ATON-HT et est basée sur les hypothèses suivantes :

- ✓ Main d'œuvre 1 personne – 30 Euro/h
- ✓ Energie électrique (120 kW - 120 kWh * 0.1 Euro = 12 Euro /h).
- ✓ Additifs et couts annexes : 5 Euro/h.

Sur la base des tarifs en Pologne, le cout de traitement revient à 110 € / tonne.

Ce qui est très compétitif comparé aux couts de traitement en installation de traitement des déchets.

ATON-HT affirme pouvoir réduire encore ce cout par des économies d'échelle mais surtout en mixant les déchets amiantés avec d'autres types de déchets et notamment des déchets « énergétiques » (en mixant des panneaux d'amiante ciment avec des pneus usagés par exemple, il est possible de réduire de 80 % la consommation d'énergie).

Le procédé développé par ATON HT semble avoir démontré son efficacité à travers la mise en œuvre d'opérations pilotes. Cependant la perte de contact avec nos interlocuteurs ne permet pas de connaître les développements envisagés.

Quoiqu'il en soit, c'est sur la consommation énergétique que cette technologie présente son principal avantage. Les micro-ondes permettent le chauffage direct du déchet et dans l'intégralité de son volume ce qui apporte une meilleure efficacité thermique comparée aux autres procédés.

3.3.3.6. Procédé NEO ECO RECYCLING

3.3.3.6.1. Historique et présentation

Neo-Eco Recycling est un bureau d'études et d'ingénierie qui travaille sur la valorisation de déchets en s'inscrivant dans le concept d'économie circulaire.

Leur périmètre de service inclut la caractérisation de déchets, la mise au point de lignes de tri ainsi que des solutions de valorisation (éco-produits, écologie industrielle...)

Réalisations :

- Neo Eco Recycling a notamment beaucoup travaillé sur des formulations béton (béton / bois ; Béton / pneumatiques ; béton / mâchefers ...)
- Mise au point d'une ligne de tri de déchets de déconstruction pour l'entreprise Ramery
- Eco-produits pour des enseignes grands publics
- Etc...

Leur partenaire usuel au niveau ingénierie est l'entreprise RESSOR.

Le procédé de traitement des déchets amiantés actuellement développé par Neo-Eco recycling est basé sur un brevet déposé par l'Institut National Polytechnique (INP) de Toulouse et dont les inventeurs sont M. Denis Ghislain et M. Michel Delmas.

3.3.3.6.2. La référence du brevet

WO2009141565 : METHODE DE TRAITEMENT D'UN SOLIDE AMIANTE (publié le 27/11/2009)

Sur ce projet, Neo-Eco est en relation avec Toulouse Tech Transfer (<http://www.toulouse-tech-transfer.com>) qui a pour vocation de valoriser les brevets du CNRS et d'accélérer le transfert de la recherche publique vers l'entreprise.

Neo-Eco recycling n'a pas acheté le brevet mais a pris une option dessus. L'achat sera discuté ultérieurement, une fois que les tests auront confirmé le potentiel d'industrialisation du brevet.

A ce jour, Neo Eco Recycling a validé le processus en laboratoire prévoit de mettre en œuvre un pilote industriel en partenariat avec l'ADEME Nord et l'entreprise Baudalet Environnement (<http://www.baudalet-environnement.fr>), société du Nord de la France spécialisé dans la collecte, le recyclage, le traitement et la valorisation de déchets.

Le procédé de traitement est mobile, il tient dans un container qui peut être déplacé directement sur les chantiers de désamiantage.

Les premiers essais sont prévus courant 2016.

Cependant, la DREAL impose la mise en œuvre du pilote industriel en installation fixe. Il sera possible, une fois la validité du procédé démontrée d'utiliser le process en unité mobile sur la base d'autorisations spécifiques délivrées par la DREAL.

3.3.3.6.3. Description du procédé :

Le procédé est basé sur une destruction de la structure fibreuse de l'amiante par une attaque acide à chaud. L'acide utilisé étant de l'Acide Chlorhydrique dilué à 8,5%.

Puis une récupération de la silice sous forme solide.

Et dans un deuxième temps la valorisation des co-produits présents dans la phase liquide sous forme d'hydroxydes et de chlorures. Les schémas ci-dessous résument le procédé dans le cas où le déchet est de l'amiante peu polluée par des liants hydrauliques (flocages / calorifugeages) et le cas de l'amiante-ciment.

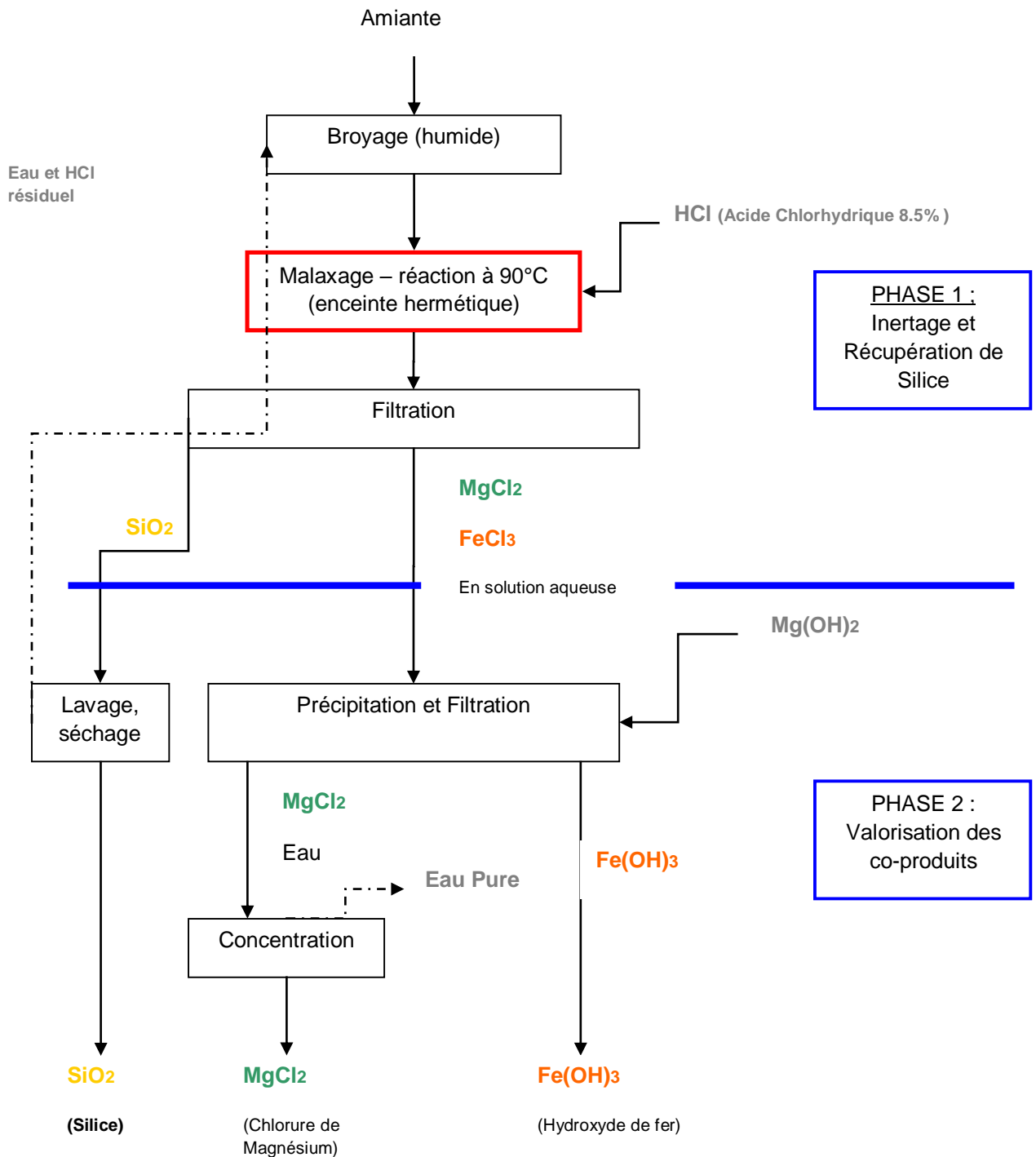


Figure 67 Synoptique procédé Neo Eco Recycling - Amiante

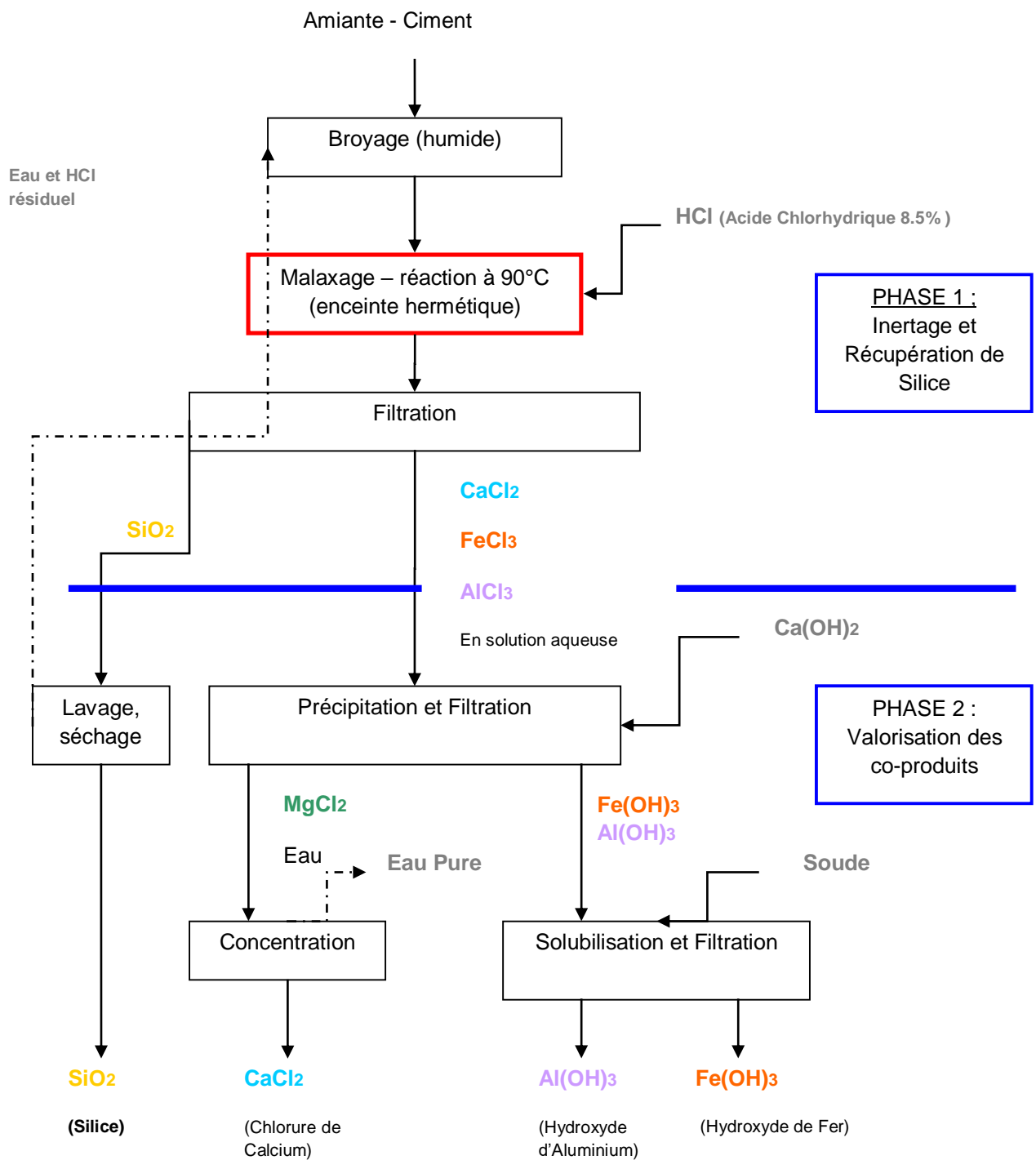


Figure 68 Synoptique procédé Neo Eco Recycling – Amiante-Ciment

Le procédé de traitement peut être séparé en 2 phases distinctes dans le temps et dans l'espace :

- La phase d'inertage et de récupération de silice,
- La phase de valorisation des co-produits (Fe, Mg mais aussi Ca, Al en fonction des liants présents dans le déchet amianté)

La phase d'inertage peut être mise en œuvre en unité mobile directement sur chantier.

La phase de valorisation nécessite une installation fixe de plus grande capacité qui est envisagée sur le site de Baudalet environnement à Blaringhem (59).

Tous types d'amiante (serpentes, amphiboles..etc) sont susceptibles d'être traitées. Mais aussi sous ses différentes formes en terme de déchets amiantés (flocages, liée avec du plâtre, du ciment, plaques fibro-ciment..etc).

Neo-Eco Recycling a réalisé des tests également sur l'amiante mélangée à des EPI (Equipements de Protection Individuelle), du bois, des dalles de plafond mais aussi la présence de peintures, colle, etc

A l'issue de ces tests multiples, il apparaît qu'à l'exception des déchets qui combinent amiante et asphalte et des déchets de type joints amiantés/silicone le procédé parvient à neutraliser la structure fibreuses de tous types de déchets amiantés.

Neo Eco estime que le procédé reste valable pour le traitement de fibres minérales artificielles mais ne l'a pas encore testé.

D'après Neo Eco, le process en lui-même a une tolérance importante sur la matière entrante. Cependant il est impossible de dire à ce stade s'il sera possible de traiter tous les déchets selon un process unique (en calibrant les conditions du procédé au plus défavorable ou en travaillant sur la qualité du mix à l'entrée) ou s'il faudra moduler (temps de broyage / temps de traitement / quantité de réactifs) en fonction de la nature du déchet amianté.

Enfin, même si le procédé reste in fine tolérant sur la matière entrante, les divers polluants demeurent un problème potentiel au niveau de la gestion des eaux de process.

Phase d'inertage : (broyage / Introduction HCl et malaxage / Test DRX / Filtration)

La première étape de cette phase consiste à broyer les déchets amiantés. L'objectif du broyage est d'une part de réduire la granulométrie (ce qui augmente la surface de contact et facilite l'attaque acide à l'étape suivante) et d'autre part d'homogénéiser le déchet.

La granulométrie attendue est de l'ordre du millimètre mais devra être confirmée lors des tests sur chantier. Un broyage fin facilite l'attaque acide de l'étape suivante mais augmente aussi le temps de broyage (donc les couts)

Il faut trouver un optimum entre temps de broyage, granulométrie et homogénéité.

Cet optimum dépendant également de la typologie du déchet amianté en entrée du broyeur.

La méthode d'alimentation du broyeur reste encore à valider mais l'amiante sera certainement introduite ensachée et avec un système d'aspiration pour éviter la diffusion des poussières. La dimension des déchets à l'entrée du broyeur n'a pas été identifiée comme un point de blocage. Les discussions préalables avec les désamianteurs laissent penser que le déchet est généralement de petite taille.

Le broyage sera probablement effectué en milieu humide (pour limiter la production de poussière) mais ceci reste également à valider.

Une fois le déchet broyé, il est transféré dans une cuve hermétiquement fermée où il est mélangé avec de l'Acide Chlorhydrique et malaxé jusqu'à destruction complète de la structure fibreuse de l'amiante.

Cette étape se déroule à une température de 90°C.

La méthode de chauffage reste là aussi à déterminer : Chauffage de la cuve ? Préchauffage de la solution acide avant introduction dans la cuve ? Stockage intermédiaire du broyat pour préchauffage ?

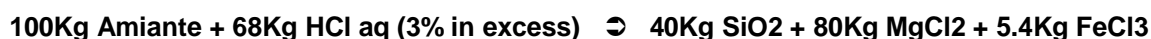
Il faudra arbitrer entre des questions d'espace disponible, de sécurité et de durée de traitement sachant que les solutions de préchauffage présentent l'intérêt de réduire la durée de traitement.

L'augmentation de Température dans la cuve génère une surpression relativement faible qui ne présente pas de problème à gérer. La cuve aura certainement un événement mais les quantités de gaz potentiellement évacués restent faibles – à valider lors des tests sur chantier.

La méthode d'introduction et de dosage de la solution acide dans la cuve reste à préciser.

La méthode de malaxage / agitation et sa cinétique restent aussi à valider

La réaction de l'amiante avec HCl est la suivante :



Où

68Kg HCl aq est concentré à 8.5% et obtenu par le mélange de 183 L HCl 32% (concentration usuelle dans le commerce) avec 600 L H₂O.

On introduit donc dans la cuve hermétique des batch d'environ 850 litres (783 litres d'HCl en solution + 100 kg d'amiante broyée)

Après cette première phase (broyage + malaxage), L'amiante est dissoute.

On obtient un produit silicique (phase solide sous forme SiO₂) et les espèces cationiques du Fer, Aluminium, Magnésium et Calcium en solution (phase liquide).

Les essais en laboratoire montrent que la dissolution de l'amiante est assurée au bout d' 1 heure mais 20 minutes suffisent généralement.

Lors des essais sur chantier, il est prévu de mettre en œuvre un test DRX (Diffraction Rayons X) directement sur chantier afin de contrôler que l'amiante a effectivement été inertée. Ce test DRX praticable sur site donne un résultat sous 10 minutes.

Il est prévu ensuite de récupérer le produit silicique (Phase solide) par filtration puis lavage avec 600 litres d'eau (pour éliminer l'acide chlorhydrique et les sels résiduels).

L'eau de lavage est ré-utilisée dans le process.

A noter que lors de cette filtration on va recueillir d'autres déchets solides (issus notamment des liants, ou tels que du bois par exemple...)

C'est dans la qualité de la silice obtenue à ce stade qu'est la clé de la réussite du process. Neo-Eco Recycling espère obtenir ici une silice suffisamment pure pour être valorisée. Cette pureté dépend notamment de la typologie du déchet en entrée de process et des conditions de mise en œuvre du procédé sur le terrain.

Si la silice n'est pas suffisamment pure, elle sera traitée en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux.

Phase de valorisation

Commence ensuite la phase de valorisation des différents sous-produits

La phase liquide contenant les espèces cationiques du fer, de l'aluminium (provenant du liant hydraulique), du magnésium et du calcium est traitée afin d'en extraire les co-produits valorisables par précipitation sélective des espèces cationiques du Fer et de l'Aluminium puis filtration. La solution est faiblement acide (résidus d'HCl non consommé dans la phase d'inertage)

Pour obtenir en fin de process un hydroxyde de fer [Fe(OH)₃] et un hydroxyde d'aluminium [Al(OH)₃].

Exemple pour le Fer:



Après cette étape, la phase liquide restante contient encore des chlorures de magnésium (MgCl₂) et de Calcium (CaCl₂ – uniquement dans le cas d'amiante ciment) qui sont récupérés par évaporation. L'eau et les résidus de HCl évaporés sont récupérés par condensation et ré-introduits dans le process.

MgCl₂ -> Evaporation -> 80 Kg de MgCl₂

Le process est discontinu (on fait un batch, on vide, on en fait une autre...etc)

Le cout de traitement envisagé devrait rester inférieur à 200 €HT /tonne mais les études économiques sont en cours et seront principalement validées avec l'utilisation du pilote industriel.

Des enjeux pratiques restent également à valider / tester sur site :

- Couplage de l'unité mobile sur les sas de désamiantage
- Stockage tampon (et pré-chauffage)
- Gestion de HCL (Stockage, manipulation, dosage)
- Contrôle que le déchet est réellement inerté (Test DRX sur chantier)
- Méthode d'évacuation du déchet inerte, de la phase liquide et introduction d'un nouveau batch
- Adaptabilité du process en fonction de la typologie du déchet amianté ? ou process unique ?

Neo Eco Recycling a initié des contacts avec plusieurs industriels Français et étrangers concernant la valorisation de la silice obtenue en fin de process.

En parallèle Neo Eco Recycling a réalisé une étude de marché pour identifier le potentiel de valorisation des autres sous produits du procédé (identification des exutoires possibles, prix de vente envisageables).

Le procédé développé par Neo Eco Recycling apparaît comme prometteur.

Au-delà de son efficacité dans l'inertage de l'amiante, ce sont la possibilité de mise en œuvre directement sur chantier ainsi que les ambitions affichées en termes de valorisation des produits issus du traitement, et notamment la silice qui rendent le procédé particulièrement intéressant.

La mise en œuvre d'un pilote industriel en 2016 sera déterminante pour envisager un déploiement du procédé. Il faudra notamment valider l'efficacité du procédé pour des configurations de déchets amiantés diverses et résoudre plusieurs problèmes très pratiques de mise en œuvre liés à la sécurité des opérateurs (entrée / sortie des produits ; stockage ...)

A ce stade l'intérêt économique de la phase de valorisation n'est pas démontré.

3.3.3.7. Procédé VALMIANTE (Valorisation Zeolite)

3.3.3.7.1. Historique et présentation

Au-delà des brevets identifiés, existe également le projet Valmiant, porté par la SOMEZ (Société Méditerranéenne des zéolithes) en partenariat avec le Laboratoire de Matériaux à Porosité Contrôlée de l'Université de Haute-Alsace (LMPC, UMR CNRS 7016) et avec le soutien de l'ADEME

Le projet a pour but de concevoir un procédé de valorisation de déchets d'amiante en Zéolithe.

Une zéolithe, ou zéolite est un cristal formé d'un squelette microporeux d'aluminosilicate, dont les espaces vides connexes sont initialement occupés par des cations et des molécules d'eau. Lesions et les molécules d'eau sont mobiles au sein de la structure, ce qui permet d'une part des échanges ioniques, d'autre part une déshydratation partielle réversible, et la possibilité de remplacer l'eau par une autre phase adsorbée.

Le caractère cristallin du squelette implique que les porosités de la structure sont toutes de même taille. Ces porosités peuvent autoriser ou non le passage de molécules, avec un pouvoir discriminant inférieur à 100 picomètres.

Les zéolithes pourront être utilisées dans l'industrie comme tamis moléculaires, adsorbants, pièges moléculaires, catalyseur ou séparateur de gaz.

La première phase du projet (initiée en 2005) a donné lieu à une synthèse publique en Octobre 2008.

Les déchets amiantés concernés sont les déchets d'amiante libre issus de flocage et calorifugeage et contenant une forte proportion d'amiante chrysotile.

La deuxième phase du projet arrive à son terme.

Le procédé ne fait pas encore l'objet d'un dépôt de brevet. De ce fait, L'entreprise SOMEZ ne souhaite pas communiquer sur ce sujet. En revanche L'ADEME a accepté de communiquer des informations sur le projet en cours.

3.3.3.7.2. Description du procédé

Le principe utilisé est basé sur une attaque acide à froid.

La première étape consiste à laisser « tremper » l'amiante pendant 30 jours dans une solution acide (H_2SO_4) afin de dénaturer la structure fibreuse de l'amiante.

La quantité de SiO_2 et de MgO obtenue dépend directement de la qualité du déchet en entrée de procédé. Pour 100 kg d'amiante chrysotile homogène, on obtient environ 40 kg de SiO_2 et 30 Kg de MgO

La deuxième étape consiste à valoriser les matériaux obtenus.

En y ajoutant de l'alumine, de la soude et de l'eau, la phase solide composée essentiellement de silice amorphe est valorisée par altération hydrothermale ou en milieux fluorés. Des zéolithes "A", "X", Silicalite-1, et "Beta" sont ainsi produites.

Le MgO contenue dans la phase liquide est précipité et peut être utilisé comme amendement agricole.

Il est à noter que les matériaux solides obtenus à l'issue de la première phase peuvent être utilisés comme floculants dans le traitement physico-chimique des eaux usées et que la silice amorphe étant de bonne qualité peut également être valorisée comme catalyseur.

A l'issue de la première phase, il est donc apparu d'une part que la structure fibreuse des amiantes était détruite par traitement à l'acide et que d'autre part les produits issus de ce traitement montraient un potentiel important de valorisation dans plusieurs voies :

- ✓ Zéolithes synthétisées par altération hydrothermale des (Phase solide)
- ✓ Amendement magnésien de terres agricoles (MgO)
- ✓ Floculant – Coagulant pour le traitement des eaux (Phase solide)
- ✓ Catalyseurs pour l'industrie chimique (Phase solide)
- ✓ Synthèses des polysiloxanes [Silicone polymers] 'phase solide)

En revanche, dans le cas de déchets hétérogènes (notamment avec une forte proportion de gypse provenant du plâtre utilisé comme liant dans les flocages / calorifugeages), la synthèse de zéolithes s'avère beaucoup plus complexes et nécessite une étape préalable de tri/ lavage

D'autre part le procédé ne permet pas de valoriser les amiantes amphiboles qui après dénaturation par l'attaque acide pourront être placés en ISDND.

A l'issue de cette première phase, les rapporteurs du projet concluent à la pertinence de l'étude mais soulignent également la nécessité de poursuivre les recherches afin de pouvoir envisager un schéma de principe global du procédé.

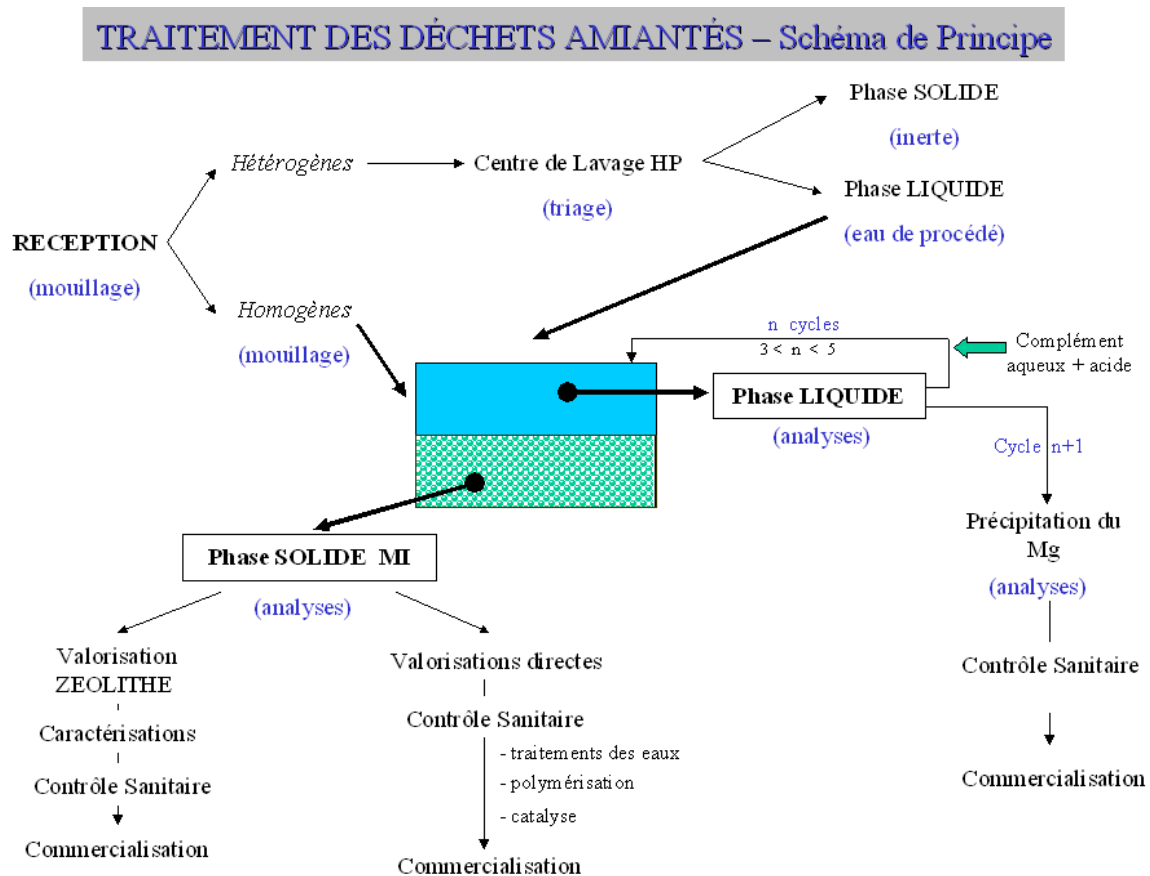


Figure 69 Schéma de principe du traitement des déchets amiantés

Le projet VALMIANTE a donc reçu le soutien de l'ADEME pour conduire une deuxième phase de recherche et poursuivre les objectifs suivants :

- Etudier la faisabilité du projet quelle que soit la forme d'amiante (Amphibole / chrysotile)
- Etudier des procédés par voie biologique (en parallèle ou en combinaison avec la voie chimique/acide)

3.3.3.7.3. Données économiques

L'objectif du projet est de proposer une solution de valorisation qui soit économiquement plus intéressante que le stockage en CET.

Cependant, aucune donnée économique n'est disponible à ce stade.

Le procédé est au stade du pilote laboratoire. La synthèse publique de cette deuxième phase est actuellement en cours de rédaction et nous ne pouvons pas conclure sur la faisabilité du projet.

Outre la valorisation des déchets amiantés en matériaux à forte valeur ajoutée, l'absence de broyage, malaxage.. etc a le double avantage d'éviter la diffusion de fibres et de réaliser des économies d'énergie.

Cependant, le procédé proposé avec des durées de traitement de 30 jours et une valorisation complexe dans sa deuxième étape, pourra difficilement constituer une réponse significative au problème du traitement des déchets amiantés.

Même si le procédé peut être développé à une échelle industrielle, les volumes traités resteront certainement anecdotique au regard des besoins.

3.3.3.8. Procédé INERTAM

3.3.3.8.1. Informations générales sur la société :

INERTAM est une filiale du Groupe EUROPLASMA qui a comme activités principales :

- Le traitement des déchets amiantés
- La vente d'équipements liés à la technologie de la Torche à Plasma
- La production d'énergie (société CHO Power) par gazéification et torche à plasma sur des déchets de type refus de tri
- Le traitement de déchets très faiblement radioactifs.

INERTAM travaille sous le régime d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (rubrique identique à celles d'une unité d'incinération) et peut traiter, selon l'arrêté, 8000T/an de déchets (tonnage entrant). La société est implantée sur un ancien site de centrale thermique EDF. EDF était l'actionnaire lors de la création d'INERTAM, jusqu'en 2008 et ensuite le Groupe EUROPLASMA a repris les participations à EDF, jusqu'à ce jour.



Figure 70 Photo de l'usine INERTAM (Morcens-33)

Les principaux clients d'INERTAM sont des foncières publiques ou privés, les régions et départements, les villes, et des acteurs industriels producteurs de déchets amiantés.

3.3.3.8.2. Production et autres chiffres :

En 2013, INERTAM a traité plus de 6500 tonnes de déchets, dont une partie importante provient de la région IDF (60%) et d'autre part, EDF représente historiquement un tonnage assez important des déchets entrants. (10 à 15 %)

Ces 6500 tonnes représentent environ 2.5% du tonnage potentiel de déchets amiantés à traiter chaque année (250 kT), mais selon certains chiffres, la quantité réelle serait proche de 400kT.

Pour traiter le tonnage annuel prévisionnel de 8000t, INERTAM fonctionne avec un four de vitrification alimenté par 3 torches à plasma d'une puissance de (2 de 2MW et 1 de 500KW) pour un procédé en continu permettant d'inertiser 30tonnes/jour, soit plus d'une tonne/h, en continu.

Le procédé demande la présence de 3 personnes/tour avec un total d'environ 45 salariés sur la société (avec administratif, commercial et personnel d'entretien et manutention).

Le processus repose sur l'utilisation de la torche à plasma et cela induit des dépenses d'entretien importantes liées à la dégradation du revêtement du four. Ce revêtement est changé environ 2.5 fois/an exigeant 4 semaines d'arrêt pour environ 2500 tonnes traitées. Le cout d'investissement d'une 2eme coque du four est de 2M€ et cet investissement est à l'étude. Le cout annuel actuel pour le changement des réfractaires est estimé à 1M€.

La perte d'exploitation de 20K€/ jour est constatée lors des arrêts maintenance. C'est pour cette raison qu'un investissement sur une deuxième coque permettant de réduire les jours d'arrêts lors des maintenances programmées est à l'étude.

3.3.3.8.3. Procédé

Malgré la dénomination d'inertage, il semble que nous aillions plutôt à faire avec un procédé de vitrification qui permet de réduire le volume et tonnage des déchets entrants et de modifier leur nature physico-chimique de façon à éliminer tout risque lié à l'impact sanitaire de l'amiante.

En effet, partant d'une tonne de déchet, le processus conduit à 0.6 tonne d'un matériau inerte (vitrifié) dont la dénomination commerciale est COFALIT. Ce produit est commercialisé (5€/t actuellement) en

sous-couche dans les travaux publics et plusieurs chantiers ont été traités avec ce matériau (zones industrielles, lotissements)



Figure 71 Le procédé de vitrification au plasma (Source : Inertam)

3.3.3.8.4. Description du procédé

- Arrivée des déchets sous forme de big-bag adaptés aux déchets amiantés. Suivi documentaire (documents de route, BSDA, CAP,...)
- Stockage des déchets par catégorie dans des containers maritimes de 20 pieds, en différenciant le type de déchets : silicés, calcium d'origine fibrociment, plâtreux particuliers contenant des éléments soufrés, combustibles tels que EPI, dalles de sol, film polyane,...
- Selon les besoins, les containers sont déchargés automatiquement dans une fosse avant broyage et ensuite orientés vers des silos de stockage indépendants, par catégorie.
- L'opérateur en salle de commande, prélève dans les silos en fonction du besoin en viscosité car chaque famille réagit de façon différente lors de la phase d'échauffement et le procédé demande à ce que la viscosité moyenne reste relativement stable de façon à avoir une bonne homogénéité lors du traitement, notamment pour ne pas bloquer la convection dans le four.

- L'alimentation du four est automatique et la matière est soumise à un très fort échauffement (1500 à 1600°C) de façon à la liquéfier avant de l'extraire par des coulées régulières en fond de réacteur.



Figure 72 Coulée de COFALIT

Points limitatifs :

- Présence de métaux, du fait des risques de casse lors de la phase de broyage. Ce problème est géré lors d'une étape préalable au cours de laquelle des opérateurs récupèrent les grosses pièces métalliques dans un atelier à atmosphère contrôlée. Les métaux récupérés sont nettoyés et recyclés (gain financier) La présence de métaux peut être préjudiciable lorsque qu'elle n'a pas été identifiée avant broyage (lorsque le déchet métallique n'a pas été renseigné dans le devis), mais identifié en tant que déchet métallique amianté, il est réceptionné, démantelé, seule l'amiante présente dans l'équipement est vitrifiée, les autres déchets sont recyclés. A savoir 800 tonnes de déchets par an sont ainsi démantelés.
- Durée de vie du revêtement du four (voir ci-dessus)
- Impact financier des arrêts entretien
 - Sous-produits traités et récupérés (chaux) en fin de process et représentant environ 10% du tonnage traité (similaire à un four d'incinération classique) :
 - SOx liés à la présence de soufre dans les déchets plâtreux,
 - HCl lié à la présence de PVC dans les dalles de sols en particulier.

3.3.3.8.5. Projets, Développements

Essentiellement sur la valorisation du matériau COFALIT au travers de l'étude CESCO menée avec l'Université de Perpignan dans le but d'être employé comme support de récupération de chaleur dans le solaire thermique (panneaux solaires)

D'autre part, des projets sont engagés en liaison avec l'unité CHO Power pour récupérer de l'énergie au cours du procédé et la réinjecter.

D'autre part, comme indiqué plus haut, une étude d'investissement sur une deuxième coque, et également un investissement sur une deuxième ligne de traitement si l'augmentation des tonnes entrantes est maintenue.

Malgré les contraintes de coûts liées d'un part à une consommation énergétique importante (Torche à plasma) et d'autre part à une maintenance lourde, le procédé INERTAM est le seul actuellement en France à offrir une solution définitive au traitement de l'amiante.

Sa capacité reste relativement faible comparée au gisement de déchets amiantés (Inertam représente environ 2,5% de part de marché).

Les projets de développement ciblant d'une part des économies d'énergie et d'autre part une valorisation plus intéressante du COFALIT pourrait permettre à l'avenir d'abaisser le coût du traitement.

3.3.4. Synthèse de l'analyse des procédés de traitement des matériaux fibreux contenant de l'amiante

Avancées technologiques en matière de conversion thermo chimique des déchets amiantés

Les procédés de traitement ont été sélectionnés pour leur capacité à supprimer les risques sanitaires et environnementaux liés aux déchets amiantés.

Le procédé INERTAM de vitrification des déchets amiantés par torche à plasma reste à ce jour le seul exploité à une échelle industrielle bien qu'il induise un coût de traitement élevé par rapport au stockage en installation de traitement des déchets dédiée.

Le procédé DMS (Direct Melting System) qui relève de la gazéification des déchets semble être à même de proposer une solution de traitement par fusion/vitrification des déchets amiantés. Cependant, malgré une utilisation assez répandue au Japon, cette technologie ne parvient pas à s'implanter en Europe.

Concernant les traitements thermo-chimiques, les procédés les plus avancés se basent sur l'utilisation d'un agent minéralisant qui va permettre de détruire la structure fibreuse de l'amiante par un traitement thermique ne nécessitant pas d'atteindre le point de fusion.

Les 2 procédés retenus (ARI Technologies et ATON-HT) fonctionnent sur un principe théorique similaire utilisant un agent minéralisant de même nature (silicate de sodium / borax). C'est sur le volet du traitement thermique que se fait la différence.

ARI technologie a choisi d'utiliser un four à foyer rotatif qui offre l'avantage d'être parfaitement maîtrisé dans le cadre d'une utilisation industrielle (Sidérurgie) et la possibilité de traiter de grands volumes de déchets.

Ce procédé est actuellement le plus avancé. Après la mise en œuvre de pilotes industriels aux Etats-Unis et une exploitation commerciale limitée, la construction d'une unité de traitement d'une capacité de 50 t/ jour est prévue dans le Sud de l'Angleterre courant 2016.

Le procédé a fait ses preuves et il y a peu de doute sur la faisabilité technique du projet. Sur le plan économique, le coût annoncé (200 € / tonne mais qui reste à valider) viendrait sérieusement concurrencer les tarifs de stockage en installation dédiée relativement élevés en Angleterre.

ATON-HT a développé une voie originale consistant à utiliser un champ électromagnétique (micro-ondes) pour le traitement thermique des déchets. Cette technologie peu répandue sur un plan industriel a également une capacité moindre même si ATON-HT affirme pouvoir construire une unité pouvant traiter 1 tonne / h.

ATON-HT cherche déjà à commercialiser son procédé (licence, vente de réacteur) qui a fait ses preuves avec le déploiement d'un pilote industriel en conditions réelles d'exploitation.

Le principal atout de ce procédé réside dans sa faible consommation énergétique et un cout final de traitement compétitif (110 € / tonne) qui reste à valider.

Les traitements thermochimiques basés sur une attaque acide (Neo-Eco Recycling / VALMIANTE) sont moins avancés. Ces 2 projets sont initiés par des acteurs Français mais sont toujours en phase de test.

Néo-Eco prévoit la mise en œuvre d'un pilote industriel sur chantier courant 2016 qui permettra de conclure sur la possibilité d'une application industrielle possible.

Sur le plan technique, des solutions de traitement de déchets amiantés à échelle industrielle se dessinent. Les tarifs annoncés sont très compétitifs mais restent à valider. Il est peut probable qu'une solution de traitement puisse être réellement commercialisée à un cout inférieur à celui du stockage en installation dédiée.

Quoiqu'il en soit, l'étude montre que l'enjeu financier pour les acteurs concernés est du côté du désamiantage proprement dit. Le cout de traitement du déchet amianté pèse peu dans le bilan économique global d'une opération de désamiantage comme cela a été mis en évidence lors de l'analyse des retours d'expérience de déconstruction.

En outre, les déchets amiantés restent des « déchets historiques » en raison de l'interdiction de commercialisation des matériaux amiantés.

Au final, parmi les 208 brevets identifiés, 11 correspondent à des procédés de traitement complet des déchets amiantés. Leur analyse permet de conclure à l'existence d'un potentiel de 5 procédés de traitement par conversion thermo chimique en cours de développement.

Développement des technologies et caractéristiques intrinsèques du déchet amianté

In fine, est-ce que bien souvent le procédé de traitement ne va pas devoir prendre en charge, à titre d'exemple, plus de cloisons de plâtre que d'amiante ?

Compte tenu des modes opératoires mis en œuvre pour désamianter les ouvrages et équipement, les flux de déchets amiantés en entrée de traitement correspondent à des matériaux constitués certes d'amiante mais aussi :

- de plâtre, de plastiques, de béton, etc selon les cas,
- d'autres matériaux non présents à la base dans les ouvrages et équipements (produits de sablage, confinements et EPI) mais nécessaires au désamiantage et à la protection des opérateurs et de l'environnement.

Une autre problématique également importante à souligner est celle de la séparation amphibole/chrysotile prescrite par certains développeurs en entrée de traitement.

En effet, le chrysotile a une charge de surface positive ce qui a conduit les fabricants à mélanger le chrysotile avec jusqu'à 40 % d'amphiboles, qui possèdent une charge de surface négative, pour la fabrication de l'amiante-ciment (les amphiboles, après leur interdiction ont été remplacées par des agents tensio-actifs).

La nature du support a beaucoup plus d'impact sur le choix du mode de traitement que la variété d'amiante.

Or, à l'analyse des procédés en développement beaucoup ne semblent pas adaptés à la prise en charge de la complexité intrinsèque du flux de déchets amiantés.

Cette capacité à accepter une grande variabilité de composition des flux de déchets amiantés doit être un critère fort dans l'appréciation des différents procédés.

En outre, les procédés de conversion thermo-chimiques peinent à offrir des capacités unitaires de traitement élevées.

Lors de l'analyse des retours d'expérience d'opérations de désamiantage, il a été montré que le précurage ciblé des bâtiments peut permettre d'optimiser les volumes des confinements et de réduire les quantités de déchets amiantés produits.

Cette démarche de prévention, rendu possible par la qualité des diagnostics amiante et un travail approfondi de définition des modes opératoires de désamiantage est essentielle ; elle permet la production de flux de déchets amiantés quantitativement plus faibles mais qualitativement plus riches en amiante et donc plus aptes à permettre une optimisation technico-économique des procédés.

Développement de technologies de traitement spécifiques et utilisation de procédés industriels ouverts existants pour le traitement de déchets amiantés

En cimenterie :

Les déchets amiantés sont souvent constitués d'amiante, de composition minéralogique proche des argiles (alumino-silicates hydratés) lié à du ciment (CaO) ou du plâtre (CaSO₄),

Les températures des fours de clinkérisation (800-1500°C) et les durées de traitement sont suffisantes pour dénaturer la structure fibreuse de l'amiante après contact avec un fondant mais aussi pour détruire les éventuels polluants organiques.

Il apparaît donc pertinent d'un point de vue technico économique d'explorer cette voie de valorisation, ce que n'ont pas manqué de faire les cimentiers japonais (une cinquantaine de brevets déposés sur ce sujet).

En revanche, les cimentiers français ne semblent pas favorables au développement du traitement de déchets amiantés sur leurs sites pour des questions d'acceptabilité par les populations riveraines des cimenteries mais également par leurs clients utilisateurs. En effet, on comprend aisément que dans un contexte de positionnement du béton dans les démarches de construction durable, l'introduction de déchets amiantés dans la fabrication du béton est un véritable défi commercial et de communication.

En aciérie :

En l'état actuel des technologies, il n'apparaît pas envisageable de traiter les pièces métalliques amiantées directement dans les fours d'aciéries pour procéder à leur valorisation matière.

Dans un contexte de renforcement de la maîtrise des risques lié aux opérations de désamiantage sur la santé, la mise en œuvre de travaux de recherche et développement d'une filière de valorisation des pièces métalliques amiantés apparaît pertinente.

En outre, compte tenu des coûts des opérations de désamiantage pour les maîtres d'ouvrage, le développement d'une telle filière est également un enjeu économique important.

Cependant, il convient de noter que les cimenteries et aciéries ne sont pas conçus dans leur configuration actuelle pour mettre en œuvre une prise en charge de déchets amiantés dans un objectif de performance « zéro fibre » contrairement à des procédés spécifiquement développés pour les déchets amiantés.

Développement des technologies de traitement et responsabilité du producteur de déchets

Tous les procédés de traitement sélectionnés dans le cadre de l'étude permettent un transfert de responsabilité du producteur/détenteur de déchets amiantés à l'installation de traitement de ces déchets.

Pour mémoire, dans le cas d'un traitement en installation de stockage dédiée le producteur/détenteur reste légalement responsable des déchets ; cette mesure réglementaire explique notamment l'intérêt porté au procédé INERTAM malgré son coût.

Ainsi, le risque à long terme pour le producteur du déchet amianté qui en découle, mais également les prescriptions réglementaires applicables aux déchets (limitation de l'enfouissement, accroissement des objectifs de valorisation des déchets du BTP) sont des facteurs pouvant favoriser l'exploitation commerciale de procédés de traitement apparemment mature sur le plan technique.

A noter que l'objectif du procédé Valmiane de production d'un matériau valorisable n'apparaît pas in fine prioritaire au regard des travaux menés dans le cadre de l'étude et du contexte réglementaire axé sur une limitation drastique des émissions de fibres dans l'atmosphère.

Développement des technologies de traitement et cadre réglementaire

La mise en regard des procédés en développement avec la réglementation en matière d'amiante fait apparaître de manière prégnante des difficultés juridiques.

La réglementation en matière d'amiante est éclatée entre les prescriptions du Code de l'environnement et les prescriptions du Code du Travail de la Santé ; même si cette situation répond bien à la différence d'objectifs qui existe entre ces deux codes, il n'en demeure pas moins qu'en pratique **l'application croisée des prescriptions** des deux codes dans le cadre d'une **opération globale de désamiantage soulève des difficultés.**

En effet, à titre d'exemples :

- Concernant le déchet issu du traitement d'un déchet amianté (sortie de procédé), le seuil réglementaire de concentration de 0.1 % d'une substance reconnue comme étant cancérigène, des catégories 1 ou 2 (propriété HP7 – cancérigène) sert de base juridique pour justifier d'un classement en déchet dangereux au regard de la réglementation des déchets du Code de l'Environnement.
- En revanche, les prescriptions du Code de la Santé et du Travail ne fournissent pas de prescriptions applicables en matière de risques sanitaires (du même niveau d'exigence que les valeurs d'émission de fibres mises en œuvre lors des opérations de désamiantage) pour apprécier les potentialités d'émission de fibres des déchets issus du traitement.

De même, si la réglementation en matière d'émission de fibres encadre les opérations sur les sites même de désamiantage, il n'existe pas pour les sites dédiés au traitement de déchets amiantés de prescriptions contraignantes (de nature à garantir un niveau similaire de protection des personnes) applicables aux opérations de dépotage, préparation et introduction dans des procédés de conversion thermo chimique des déchets amiantés étudiés.

Ainsi aujourd'hui, même si le procédé INERTAM ou d'autres procédés spécifiques sont travaillés pour permettre d'atteindre le « zéro fibre » la mesure et l'appréciation de cette performance de traitement ne fait pas actuellement l'objet de prescriptions réglementaires spécifiques.

3.4. Analyse critique et sélection des brevets – autres matériaux fibreux en fin de vie

3.4.1. Généralités

3.4.1.1. Les catégories de FMA et leur utilisation

L'analyse porte sur les Fibres Minérales Artificielles de nature siliceuses et vitreuses.

Il existe des FMA non siliceuses, telles que les fibres de carbone par exemple mais qui ne rentrent pas dans le cadre de l'étude.

Les FMA peuvent être classées selon les catégories suivantes :

- Les laines d'isolation (Fibres de verre, de roche, de laitier)

Cette catégorie de FMA représente plus de 95% de la production annuelle de FMA. Elles sont utilisées principalement pour l'isolation phonique et thermique dans tous types de bâtis.

- Les Fibres céramiques réfractaires (FCR)

Après une utilisation assez large jusque dans les années 90, Les FCR ne représentent aujourd'hui plus qu'environ 2% de la production de FMA et sont cantonnées presque exclusivement à des applications industrielles telles que :

- Isolation thermique de fours industriels, hauts fourneaux, moules de fonderie, tuyauteries, câbles, joints
- Industrie automobile et aéronautique
- Protection contre l'incendie

Les FCR présentent une résistance aux très hautes températures et il existe peu de solutions de substitutions pour des applications dans un environnement où la température excède 1000°C.

- Les fibres de verre à usage spécial

On estime la consommation de fibres de verre à usage spécial à 2200 tonnes/an, soit 1% environ de la consommation totale de FMA. (Données INRS). Elles peuvent être de plusieurs types, les types E et 475 étant les plus utilisées. Ce sont des FMA à haute performance qui trouvent des applications notamment dans :

- L'isolation phonique et thermique dans l'industrie aérospatiale et aéronautique (fuselage, moteurs, réacteurs),
- Les médias filtrants dans les systèmes de filtration d'air à ultra haute efficacité (ex : salles blanches),
- Séparateur dans les batteries sans entretien ou batteries solaires.

3.4.1.2. Propriétés physico-chimiques des FMA

Sur le plan de la composition chimique, les FMA sont à base de silicates et réagissent aux mêmes types de traitement que l'amiante.

Les températures de fusion des FMA varient entre 1100°C (Laine de verre) et 1500°C (FCR).

Certaines FCR spécifiques pourront cependant avoir des températures de fusion plus élevées, jusqu'à 1700°C

Contrairement à l'amiante, les FMA ne sont pas hydratées (ne contiennent pas d'eau dans leur structure chimique) et ne peuvent donc pas subir un procédé de déshydratation comme pour l'amiante.

Si l'on fait le choix d'une élimination, les procédés de fusion/vitrification haute température utilisés pour l'amiante restent valides.

Cependant, les FMA restant commercialisées, nous proposons d'étudier les éventuels procédés de recyclage plutôt que les solutions d'élimination.

3.4.2. Identification des brevets

Pour la recherche de brevet, nous avons procédé de la même manière que pour l'amiante en faisant une recherche sur la base Patentscope du World International Patent Organisation (WIPO).

Les expressions clés utilisées :

- Mineral wool waste treatment
- Mineral fibrous material waste treatment
- Glass wool waste treatment
- Rock wool waste treatment
- Slag fiber waste treatment
- Ceramic fiber waste treatment
- Artificial mineral fiber waste treatment
- Mineral fibrous material waste

Après tri des brevets ne concernant pas l'étude et élimination des doublons, seuls 8 brevets entrent dans le cadre de l'étude. Compte tenu du nombre réduit de brevets, il n'a pas été jugé nécessaire de limiter la recherche aux brevets publiés après 2004.

Ref Brevet	Date de Publication	Brevet	Déposants
WO2000015569	24.03.2000	TREATMENT OF FIBRES	ASSET ASSOCIATES LIMITED
EP0389314	27.09.1990	Process and apparatus for melting materials containing mineral fibres.	SAINT GOBAIN ISOVER
JP2004196616	16.07.2004	TREATMENT METHOD AND TREATMENT APPARATUS FOR GLASS WOOL WASTE	NITTOBO TOGAN CO LTD; NITTO BOSEKI CO LTD
JP2001347251	19.12.2001	MACHINE AND METHOD FOR TREATING INDUSTRIAL WASTE	ASUKU SANSHIN ENGINEERING KK
EP0654017	25.05.1995	THERMAL TREATMENT PROCESS AND DEVICE FOR WASTE AND/OR RESIDUAL MATERIALS	WTU WARMETECHNIK UND UMWELTSCH
JP2004041891	13.02.2004	MATERIAL RECYCLING SYSTEM FOR ROCK WOOL	NIPPON STEEL CHEM CO LTD
WO2006018582	24.02.2006	METHOD AND DEVICE FOR TREATING FIBROUS WASTES FOR RECYCLING	SAINT-GOBAIN ISOVER
EP0747126	12.12.1996	Method and device for treating fibrous material, particularly waste inorganic wool, comprising fibres and foreign matter	THYSSEN ALTWERT UMWELTSERVICE

Figure 73 Tableau des brevets entrant dans le cadre de l'étude

3.4.3. Analyse des procédés de recyclage

L'ensemble des brevets proposent des solutions de recyclage pour les laines de verre et de roche. Les procédés décrits (broyage fin puis fusion) permettent en théorie d'éliminer les pollutions organiques (liants organiques de type résines principalement), les impuretés métalliques et l'eau éventuellement présente.

3.4.3.1. Laine de verre

La laine de verre est un matériau élaboré à partir de matières premières naturelles :

- sable,
- fondants (calcaire, dolomie ...) permettant de baisser la température de fusion du verre.

ou issues du recyclage :

- verre recyclé ou calcin,
- rebuts de production.

3.4.3.1.1. Généralités sur les techniques de recyclage des laines de verre

Fabrication de laine à souffler :

Après un broyage mécanique, la laine de verre sous forme de bille est soufflée dans les murs en guise d'isolation. Elle se substitue à de la laine de verre à souffler vierge.

Refonte de la laine de verre :

La laine de verre est refondue dans un cyclone à flamme puis directement incorporée dans le four, en substitution aux composants vierges de la laine de verre.

Saupoudrage :

Après broyage, la laine de verre est saupoudrée au dessus du mélange en fusion dans le four.

Cette méthode s'avère peu performante car

- Production de poussières qui se diffusent dans l'usine,
- Recyclage de très faibles fractions de laine de verre.

Incorporation dans des briques :

La laine de verre broyée est incorporée dans des briques en substitution d'un autre isolant (dans cette étude, de la laine de verre à souffler).

3.4.3.1.2. Commentaires

Ces procédés sont relativement similaires et ont été développés principalement pour recycler les rebuts de production.

En théorie, il est possible d'introduire des déchets de démolition mais quelque soit le procédé les contraintes exigées sont importantes. En particulier le le gisement de laine de verre ne doit pas contenir de liant hydraulique (ciment/béton), de métaux (clous, feuilles d'aluminium) ni de bois. Ces éléments posant des problèmes à la fois sur la phase de broyage et sur la phase de fusion.

Le procédé de recyclage le moins exigeant en terme de propreté du flux est le recyclage en laine de verre par refonte dans un cyclone. La présence en très faible quantité de matériaux type plastiques

n'empêche pas le recyclage, puisqu'ils sont fondus dans le cyclone au même titre que la laine de verre.

De plus, les plastiques présents dans les déchets vont brûler dans le cyclone et se transformer quasi intégralement en CO₂, très peu d'impuretés arrivant dès lors dans le bain en fusion.

Le recyclage en laine à souffler nécessite l'absence totale de matériaux type métaux, clous, plastiques, feuilles d'aluminium... La présence de déchets type papiers et cartons est tolérée, ces matériaux pouvant participer au pouvoir isolant de la laine à souffler.

Le recyclage en briqueteries a les mêmes exigences, pour des raisons de maintien des propriétés physiques des matériaux construits à partir de laine de verre recyclée, mais également pour des raisons esthétiques (matériaux intrus visibles dans la brique).

Il faut noter que la laine de verre est souvent vendue sous forme de complexes (laine de verre-papier, laine de verre-aluminium...) : les feuilles de laine de verre sont collées à une feuille d'autre matériau, ce qui est un obstacle supplémentaire au recyclage.

Actuellement, il n'existe que des procédés de séparation manuelle permettant de séparer la laine de verre des autres matériaux collés, procédés coûteux en argent et en temps. Un procédé mécanique pourrait être développé si les gisements étaient suffisants pour le justifier.

Enfin avec une densité de 15kg/m³, la laine de verre en sortie de chantier nécessite un compactage pour un coût de transport qui ne soit pas prohibitif.

La qualité du gisement est donc essentielle et nécessite une collecte sélective et un tri à la source très strict, ainsi qu'un contrôle à réception.

Pour ces raisons techniques et économiques, le recyclage de la laine de verre (déchets de chantier) reste anecdotique.

3.4.3.1.3. Procédé OXYMELT (ISOVER)

Depuis 1997, ISOVER a développé sur son site d'Orange (France) le procédé OXYMELT pour recycler ses rebuts de production,

Ce procédé permet de recycler et de réintégrer dans le procédé de fabrication 100% des rebuts de laine de verre de l'usine. Une fois transformés en calcin, ces rebuts viennent s'ajouter au verre recyclé provenant de déchets ménagers et industriels (30 000 t/an) et au sable pour former la composition verrière.

Les déchets sont fondus via l'introduction d'air enrichi en oxygène pour obtenir un matériau minéral pouvant être utilisé comme matière première vitreuse dans le processus de fusion du verre.

Certains clients industriels utilisent cette installation pour recycler leurs déchets de laines de verre ISOVER.

Depuis le début des années 2000, ISOVER propose également un service de collecte et traitement des déchets de laine de verre sur chantier, sous forme d'une vente de sacs transparents de collecte (Usine ISOVER à Orange-France et Lucens-Suisse)

Ce service ne rencontre jusqu'ici pas de succès (ni en France, ni en Suisse) car il n'est pas compétitif par rapport à la filière de collecte en conteneurs avec les autres déchets de démolition pour traitement en Installation de Stockage de Déchets.

3.4.3.1.4. WOOLREC

L'usine WOOLREC qui recyclait de la laine de verre en Allemagne (Fabrication de briques) est fermée depuis 2012. Les fondateurs sont poursuivis par la justice allemande pour « manipulation illégale de déchets ».

3.4.3.2. Laine de roche

Elle est produite à partir de basalte fondu. On utilise aussi du laitier de haut fourneau, intéressant à la fois par sa composition chimique et par le fait que ce produit, qui est calciné, libère moins de gaz à effet de serre lorsqu'il est chauffé.

Elle est obtenue par fusion dans un four chauffé au coke, appelé cubilot, à 1 460 °C. Le matériau liquide qui en sort est donc une lave de basalte qui est centrifugée, soufflée ou extrudée.

Dès leur constitution, les fibres sont enrobées de résine à base d'urée-formol et d'une huile d'imprégnation, avant de passer dans une étuve pour y être polymérisé, et rendre le produit stable et hydrophobe.

Elle est plus brune et plus dense que la laine de verre

Programme ROCKCYCLE

La société ROCKWOOL, un des leaders dans la fabrication de laine de roche a développé le programme ROCKCYCLE pour le recyclage de ses produits.

<http://www.rockwool.fr/services/rockcycle>

Ce service s'adresse :

- Aux entreprises de pose (clients étancheurs) qui posent les produits Rockwool et concerne uniquement les chutes de pose
- A 3 autres clients qui fabriquent des produits avec la laine Rockwool (cloisons modulaires, portes coupe feux...) là aussi pour les déchets de fabrication

Sur les chantiers, Rockwool récupère (Rockwool fournit les big bags pour conditionnement de la laine) : chutes de pose laine de roche, palettes bois, emballages PE.

Ce programme a démarré dès 2009 avec la reprise des palettes bois.

Les déchets sont acheminés vers un centre de tri (qui est aussi collecteur) et qui :

- récupère les palettes bon état et la laine de verre (après tri) qu'il ré-expédie vers une usine Rockwool,
- valorise les palettes en mauvais état,
- valorise le PE.

Dans le cadre de ce programme, Rockwool doit faire face à un problème récurrent de qualité du au non respect des exigences de tri au niveau des chantiers (chutes de pose « propres »). L'entreprise envisage la mise en œuvre de pénalités pour inciter à un meilleur tri.

Rockwool rebroye la laine et la ré-introduit en fabrication selon un mix contrôlé.

Le volume total collecte par le programme est faible puisqu'il reste inférieur aux chutes de fabrication de rockwool (qui sont déjà récupérées et ré-introduit en fabrication).

D'ailleurs si les volumes étaient plus importants cela poserait un problème car le mix supporterait difficilement une proportion plus importante (en concurrence avec les déchets de fabrication).

D'un point de vue économique, Rockwool facture ses clients pour ce service. Ainsi, dans le cas d'un chantier avec entreprise générale et compte prorata, le programme ne pénètre pas les chantiers (puisque les étancheurs payent déjà pour le déchet ...)
Sinon le programme reste souvent trop cher sur des petits chantiers mais peut être compétitif vis à vis d'un traitement en Installation de Stockage de Déchets sur des gros chantiers.

Bien que les volumes soient aujourd'hui anecdotiques, Rockwool considère que le recyclage reste un enjeu stratégique (directive européenne). Même si la société n'envisage pas à court terme la reprise de déchets de démolition elle ne se prive pas de s'y intéresser à plus long terme.

3.4.3.3. Les Fibres Céramiques réfractaires (FCR)

Les fibres céramiques réfractaires résistent à de très hautes températures. D'un prix élevé, elles sont conçues et utilisées pour des applications dépassant 800°C. Ce sont des fibres de silicate d'aluminium.

Les fibres sont commercialisées en vrac ou le plus souvent en matelas, nappes, feutres, noyé dans un liant (résine, latex..) ou utilisé comme composé de matériaux (pouvant être moulés ou usinés) tels que panneaux, mortiers, colles, bétons, textiles.

Leur usage principal est la production de matériaux réfractaires spéciaux :

- isolation de fours (industriels, hauts fourneaux...) : 50 %
- isolation d'appareils de chauffage et chaudières industriels ou domestiques : 20 %
- isolation dans les secteurs de la métallurgie : 10 %
- isolation dans d'autres usages industriels (tuyaux, machines...) : 10 %
- autres usages : 10 % répartis dans l'automobile (pot catalytique, filtre, coussin gonflable de sécurité (« airbag »), la protection incendie (porte coupe-feu, clapet anti-feu), la production d'énergie, la construction navale, ferroviaire ou aérospatiale.

Il existe en France plusieurs usines de fabrication en particulier dans la région de St Etienne. Le marché est essentiellement tenu par deux firmes américaines Unifrax (autrefois St Gobain qui commercialisait ces fibres sous le nom de Kerlane) et Thermal Ceramics.

Elles sont produites en faisant fondre de l'alumine et de la silice, ou du kaolin (argile blanche) à des températures de l'ordre de 1500°C à 2100°C. La masse vitreuse fondue est ensuite transformée en fibres par un procédé rotatif utilisant la force centrifuge ou par soufflage d'un jet d'air ou de vapeur. Une charge variable en oxydes (zirconium, titane...) peut leur apporter une résistance exceptionnelle à la chaleur (jusqu'à 1700°C).

La société Valoref du groupe saint Gobain est spécialisée dans le recyclage de tous matériaux réfractaires. A ce titre ils offrent des solutions globales de gestion de déchets issus de la déconstruction de fours verriers.

L'entreprise travaille en partenariat avec des entreprises de déconstruction. Les méthodologies mises en œuvre sont identiques à celles d'un chantier de désamiantage.

VALOREF n'intervient que sur la gestion du déchet :

- En coordinateur déchet au niveau du chantier pour assurer un tri, conditionnement, étiquetage des déchets conforme aux exigences réglementaires mais aussi optimiser le recyclage ultérieur
- Transport jusqu'au site VALOREF situé à Bollène(84) et classé ICPE,
- Gestion de la traçabilité,
- Recyclage / élimination des déchets.

VALREF est leader européen sur ce marché avec 40.000 tonnes de déchets réfractaires traités chaque année et un taux de recyclage de 85%.

Le recyclage concerne les matériaux réfractaires formant la structure des fours (Briques, Alumine/Zircon... etc) qui sont recyclés en matières premières secondaires.

En revanche les FCR conditionnées en big bags (avec EPI... etc comme pour les déchets amiantés) sont traités en Installation de Stockage de Déchets. Il n'existe pas de solution de recyclage pour ce type de déchet qui représente une fraction anecdotique des 40000 tonnes de déchets traités annuellement.

4. Conclusion et perspectives

4.1 Principaux enseignements

*RECORD a souhaité réaliser une **revue des gisements et des différents procédés de traitement en fin de vie des matériaux à base de fibres minérales naturelles (FMN), tout particulièrement d'amiante et de fibres minérales artificielles (FMA).***

*Après avoir proposé au lecteur une synthèse des **risques pour la santé** des matériaux fibreux dans le cadre de la phase de gestion de la fin de vie de ces matériaux, l'étude s'est intéressée à l'analyse critique de procédures de **désamiantage et déconstruction d'ouvrages et d'équipements.***

En effet, l'optimisation des coûts élevés de traitement des déchets amiantifères découle du travail effectué en amont sur les procédures de désamiantage et de déconstruction ; celles-ci sont établies en s'appuyant notamment sur un diagnostic amiante, un diagnostic préalable de démolition de qualité et mais également en capitalisant les connaissances des industriels sur leur patrimoine mobilier et immobilier. Dans cette approche, l'étude relie volontairement la gestion des déchets amiantifères, malgré les spécificités réglementaires qui l'encadre, aux opérations de prévention et gestion des autres déchets liées aux projets de déconstruction d'ouvrages ou d'équipements. La pertinence d'une approche globale des deux problématiques n'étant plus à démontrer.

De l'analyse, basée sur des retours d'expérience de projets concrets de déconstruction il ressort que **la maîtrise des diagnostics amiante et déchets est un préalable à l'innovation en matière de traitement des déchets amiantés.**

Cette maîtrise constitue de surcroît un **facteur d'optimisation économique** : le coût de traitement des déchets contenant de l'amiante représente une faible part du coût global des opérations de désamiantage des ouvrages et équipements.

Il en résulte actuellement une priorisation des actions de recherche et développement sur les procédés de désamiantage par rapport aux solutions de traitement.

Dans ce cadre, industriels et prestataires mettent en œuvre des actions de capitalisation des retours d'expérience de leurs opérations de désamiantage et déconstruction qui permettent de générer des diagnostics plus précis : cartographie en 3D des ouvrages et équipements contenant de l'amiante, démarche itérative d'identification et de localisation des éléments amiantés d'un équipement,...

La qualité des diagnostics amiante accroît également les possibilités de maîtrise des risques pour la santé des opérateurs de désamiantage et l'environnement.

En matière d'organisation de la déconstruction, et en particulier de retrait des matériaux amiantés, les caractéristiques des ouvrages et équipements induisent très souvent :

- ✓ un travail manuel dans des espaces étroits difficiles d'accès pour les opérateurs,

- ✓ des espaces d'entreposage des déchets issus du désamiantage restreints (voire inexistant) nécessitant une évacuation au fil de l'eau des déchets,
- ✓ le recours à des contenants de pré-collecte des déchets de faibles dimensions type big bag d'un mètre cube pour acheminer les déchets de leur lieu de production à leur lieu de regroupement sur le site, avant enlèvement pour acheminement vers leur lieu de traitement,
- ✓ l'installation de montes charges, ensemble ponts roulants et autres dispositifs de manutention spécifiques pour le chantier.

Conséquence des prescriptions réglementaires en matière d'émission de fibres lors des opérations de désamiantage, le choix du procédé de désamiantage est déterminé avant tout par son efficacité vis-à-vis de la séparation des matériaux amiantés de leur support et ses impacts sur l'environnement de travail : sécurité des opérateurs et limitation de l'empoussièrément.

Les flux de déchets produits correspondent à des associations de matériaux contenant de l'amiante avec des matériaux qui en sont dépourvus (plâtre, métaux,...) compte tenu d'une part, des procédés de désamiantage mis en œuvre, (produit de sablage, etc), d'autre part, des difficultés de désassemblage des matériaux entre eux (flocage sur une paroi en plâtre,...).

Cette approche sécuritaire et les problématiques de séparation des matériaux posent la question de la pertinence dans certains cas du désamiantage d'éléments constitutifs d'équipements ou d'ouvrages par rapport à leur traitement direct comme déchet amianté.

En effet, l'analyse des retours d'expérience conduite dans l'étude montre les limites de la démarche de désamiantage par séparation des matériaux fibreux de leur support : l'objectif de limitation de la consommation des ressources énergétiques et non énergétique est-il atteint lorsque l'on affecte durant des heures des opérateurs au grattage et sablage de pièces métalliques (tuyauteries coudées de chaudières, pièces de moteurs,...) dans un sas de confinement ? Ne vaudrait-il pas mieux pour préserver la santé des opérateurs, diminuer les coûts et limiter les quantités de déchets (résidu de sablage amianté, EPI contaminés, bâches de confinement,...) juste isoler, découper ces éléments métalliques pour les acheminer vers une installation de stockage des déchets ?

Aujourd'hui, des freins technologiques et métrologiques existent pour la valorisation directe de déchets amiantés dans des installations industrielles non dédiées au traitement des déchets (fours d'aciéries par exemple) notamment en raison des difficultés à garantir la suppression du caractère cancérigène des matériaux amiantés au cours du process.

Mais, dans un contexte de renforcement de la maîtrise des risques lié aux opérations de désamiantage sur la santé et l'environnement la mise en œuvre de travaux de recherche et développement d'une filière de valorisation notamment des pièces métalliques amiantés apparaît pertinente.

Les opérations de désamiantage ont lieu très majoritairement (en termes de volumes de déchets produits) lors de la phase spécifique de désamiantage et sont complétées par des opérations de désamiantage complémentaires lors de la déconstruction. Aussi, une massification des flux de déchets contenant de l'amiante existe de fait et peut constituer un atout pour la mise en œuvre de procédés de prétraitement ou traitement mobiles sur site.

Les conséquences en matière de responsabilité du producteur de déchet des choix des procédés de traitement (inertage par torche à plasma ou stockage en installation dédiée) sont prépondérantes par rapport aux conséquences économiques.

Les sites industriels comportent outre des ouvrages et équipements liés au process, des bâtiments tertiaires ; il en résulte deux typologies de chantiers de désamiantage/déconstruction. Afin de limiter les quantités globales de déchets amiantés produites (déchets amiantés liés aux ouvrages ou

équipements et déchets de protection des personnels et de l'environnement), il est opportun d'adopter pour chaque typologie une organisation des prestations de désamiantage et déconstruction adaptée :

- Pour des ouvrages tertiaires, un marché de prestation réalisé par un groupement solidaire des entreprises de désamiantage et de déconstruction,
- Pour des ouvrages industriels, des marchés de prestation des opérations de désamiantage et de déconstruction distincts (mais des entreprises de déconstruction en association avec des intervenants qualifiés pour le cas échéant des prestations de désamiantage complémentaires des équipements et ouvrages.

Les conséquences des choix des procédés de désamiantage liés à la nouvelle réglementation mériteraient de faire l'objet d'une approche globale de type ACV des impacts des quantités de déchets de matériels de protection produites en regard des impacts des déchets de matériaux de construction amiantés objet de l'opération de désamiantage.

Une telle analyse apporterait des éléments de réflexion utiles pour faire évoluer les procédures actuelles de désamiantage en cohérence avec les impératifs de protection des personnes et des milieux et de maîtrise budgétaire.

En outre, elle pourrait contribuer à l'évolution de la réglementation applicable aux opérations de désamiantage et déconstruction aujourd'hui éclatée entre les prescriptions du Code de l'environnement, les prescriptions du Code du Travail de la Santé et celles du Code de la Construction et de l'Habitation.

*Les deux premières étapes de l'étude (synthèse des **risques pour la santé** des matériaux fibreux et analyse critique de procédures de **désamiantage et déconstruction d'ouvrages et d'équipements**) ont ainsi permis la définition **des flux de matériaux fibreux en fin de vie à traiter**. Puis il a été procédé à la **revue critique prospective des technologies de traitement des déchets amiantifères et des autres matériaux FMA**.*

Les principaux enseignements de l'étude en matière de **technologies de traitement des déchets amiantifères** sont les suivants :

Avancées technologiques en matière de conversion thermo chimique des déchets amiantés

Les procédés de traitement ont été sélectionnés pour leur capacité à supprimer les risques sanitaires et environnementaux liés aux déchets amiantés.

Le procédé INERTAM de vitrification des déchets amiantés par torche à plasma reste à ce jour le seul exploité à une échelle industrielle bien qu'il induise un cout de traitement élevé par rapport au stockage en installation de traitement des déchets dédiée.

Le procédé DMS (Direct Melting System) qui relève de la gazéification des déchets semble être à même de proposer une solution de traitement par fusion/vitrification des déchets amiantés. Cependant, malgré une utilisation assez répandue au Japon, cette technologie ne parvient pas à s'implanter en Europe.

Concernant les traitements thermo-chimiques, les procédés les plus avancés se basent sur l'utilisation d'un agent minéralisant qui va permettre de détruire la structure fibreuse de l'amiante par un traitement thermique ne nécessitant pas d'atteindre le point de fusion.

Les 2 procédés retenus (ARI Technologies et ATON-HT) fonctionnent sur un principe théorique similaire utilisant un agent minéralisant de même nature (silicate de sodium / borax). C'est sur le volet du traitement thermique que se fait la différence.

ARI technologie a choisi d'utiliser un four à foyer rotatif qui offre l'avantage d'être parfaitement maîtrisé dans le cadre d'une utilisation industrielle (Sidérurgie) et la possibilité de traiter de grands volumes de déchets.

Ce procédé est actuellement le plus avancé. Après la mise en œuvre de pilotes industriels aux Etats-Unis et une exploitation commerciale limitée, la construction d'une unité de traitement d'une capacité de 50 t/ jour est prévue dans le Sud de l'Angleterre courant 2016.

Le procédé a fait ses preuves et il y a peu de doute sur la faisabilité technique du projet. Sur le plan économique, le cout annoncé (200 € / tonne mais qui reste à valider) viendrait sérieusement concurrencer les tarifs de stockage en installation dédiée relativement élevés en Angleterre.

ATON-HT a développé une voie originale consistant à utiliser un champ électromagnétique (micro-ondes) pour le traitement thermique des déchets. Cette technologie peu répandue sur un plan industriel a également une capacité moindre même si ATON-HT affirme pouvoir construire une unité pouvant traiter 1 tonne / h.

ATON-HT cherche déjà à commercialiser son procédé (licence, vente de réacteur) qui a fait ses preuves avec le déploiement d'un pilote industriel en conditions réelles d'exploitation.

Le principal atout de ce procédé réside dans sa faible consommation énergétique et un cout final de traitement compétitif (110 € / tonne) qui reste à valider.

Les traitements thermo-chimiques basés sur une attaque acide (Neo-Eco Recycling / VALMIANTE) sont moins avancés. Ces 2 projets sont initiés par des acteurs Français mais sont toujours en phase de test.

Néo-Eco prévoit la mise en œuvre d'un pilote industriel sur chantier courant 2016 qui permettra de conclure sur la possibilité d'une application industrielle possible.

Sur le plan technique, des solutions de traitement de déchets amiantés à échelle industrielle se dessinent. Les tarifs annoncés sont très compétitifs mais restent à valider. Il est peut probable qu'une solution de traitement puisse être réellement commercialisée à un cout inférieur à celui du stockage en installation dédiée.

Quoiqu'il en soit, l'étude montre que l'enjeu financier pour les acteurs concernés est du côté du désamiantage proprement dit. Le cout de traitement du déchet amianté pèse peu dans le bilan économique global d'une opération de désamiantage comme cela a été mis en évidence lors de l'analyse des retours d'expérience de déconstruction.

En outre, les déchets amiantés restent des « déchets historiques » en raison de l'interdiction de commercialisation des matériaux amiantés.

Au final, parmi les 208 brevets identifiés, 11 correspondent à des procédés de traitement complet des déchets amiantés. Leur analyse permet de conclure à l'existence d'un potentiel de 5 procédés de traitement par conversion thermo chimique en cours de développement.

Développement des technologies et caractéristiques intrinsèques du déchet amianté

In fine, est-ce que bien souvent le procédé de traitement ne va pas devoir prendre en charge, à titre d'exemple, plus de cloisons de plâtre que d'amianté ?

Compte tenu des modes opératoires mis en œuvre pour désamianter les ouvrages et équipement, les flux de déchets amiantés en entrée de traitement correspondent à des matériaux constitués certes d'amiante mais aussi :

- de plâtre, de plastiques, de béton, etc selon les cas,
- d'autres matériaux non présents à la base dans les ouvrages et équipements (produits de sablage, confinements et EPI) mais nécessaires au désamiantage et à la protection des opérateurs et de l'environnement.

Une autre problématique également importante à souligner est celle de la séparation amphibole/chrysotile prescrite par certains développeurs en entrée de traitement.

En effet, le chrysotile a une charge de surface positive ce qui a conduit les fabricants à mélanger le chrysotile avec jusqu'à 40 % d'amphiboles, qui possèdent une charge de surface négative, pour la fabrication de l'amiante-ciment (les amphiboles, après leur interdiction ont été remplacées par des agents tensio-actifs).

La nature du support a beaucoup plus d'impact sur le choix du mode de traitement que la variété d'amiante.

Or, à l'analyse des procédés en développement beaucoup ne semblent pas adaptés à la prise en charge de la complexité intrinsèque du flux de déchets amiantés.

Cette capacité à accepter une grande variabilité de composition des flux de déchets amiantés doit être un critère fort dans l'appréciation des différents procédés.

En outre, les procédés de conversion thermo-chimiques peinent à offrir des capacités unitaires de traitement élevées.

Lors de l'analyse des retours d'expérience d'opérations de désamiantage, il a été montré que le pré-curage ciblé des bâtiments peut permettre d'optimiser les volumes des confinements et de réduire les quantités de déchets amiantés produits.

Cette démarche de prévention, rendu possible par la qualité des diagnostics amiante et un travail approfondi de définition des modes opératoires de désamiantage est essentielle ; elle permet la production de flux de déchets amiantés quantitativement plus faibles mais qualitativement plus riches en amiante et donc plus aptes à permettre une optimisation technico-économique des procédés.

Développement de technologies de traitement spécifiques et utilisation de procédés industriels ouverts existants pour le traitement de déchets amiantés

En cimenterie :

Les déchets amiantés sont souvent constitués d'amiante, de composition minéralogique proche des argiles (alumino-silicates hydratés) lié à du ciment (CaO) ou du plâtre (CaSO₄),

Les températures des fours de clinkérisation (800-1500°C) et les durées de traitement sont suffisantes pour dénaturer la structure fibreuse de l'amiante après contact avec un fondant mais aussi pour détruire les éventuels polluants organiques.

Il apparaît donc pertinent d'un point de vue technico économique d'explorer cette voie de valorisation, ce que n'ont pas manqué de faire les cimentiers japonais (une cinquantaine de brevets déposés sur ce sujet).

En revanche, les cimentiers français ne semblent pas favorables au développement du traitement de déchets amiantés sur leurs sites pour des questions d'acceptabilité par les populations riveraines des cimenteries mais également par leurs clients utilisateurs. En effet, on comprend aisément que dans un contexte de positionnement du béton dans les démarches de construction durable,

l'introduction de déchets amiantés dans la fabrication du béton est un véritable défi commercial et de communication.

En aciérie :

En l'état actuel des technologies, il n'apparaît pas envisageable de traiter les pièces métalliques amiantées directement dans les fours d'aciéries pour procéder à leur valorisation matière.

Dans un contexte de renforcement de la maîtrise des risques lié aux opérations de désamiantage sur la santé, la mise en œuvre de travaux de recherche et développement d'une filière de valorisation des pièces métalliques amiantées apparaît pertinente.

En outre, compte tenu des coûts des opérations de désamiantage pour les maîtres d'ouvrage, le développement d'une telle filière est également un enjeu économique important.

Cependant, il convient de noter que les cimenteries et aciéries ne sont pas conçues dans leur configuration actuelle pour mettre en œuvre une prise en charge de déchets amiantés dans un objectif de performance « zéro fibre » contrairement à des procédés spécifiquement développés pour les déchets amiantés.

Développement des technologies de traitement et responsabilité du producteur de déchets

Tous les procédés de traitement sélectionnés dans le cadre de l'étude permettent un transfert de responsabilité du producteur/détenteur de déchets amiantés à l'installation de traitement de ces déchets.

Pour mémoire, dans le cas d'un traitement en installation de stockage dédiée le producteur/détenteur reste légalement responsable des déchets ; cette mesure réglementaire explique notamment l'intérêt porté au procédé INERTAM malgré son coût.

Ainsi, le risque à long terme pour le producteur du déchet amianté qui en découle, mais également les prescriptions réglementaires applicables aux déchets (limitation de l'enfouissement, accroissement des objectifs de valorisation des déchets du BTP) sont des facteurs pouvant favoriser l'exploitation commerciale de procédés de traitement apparemment mature sur le plan technique.

A noter que l'objectif du procédé Valmiant de production d'un matériau valorisable n'apparaît pas in fine prioritaire au regard des travaux menés dans le cadre de l'étude et du contexte réglementaire axé sur une limitation drastique des émissions de fibres dans l'atmosphère.

Développement des technologies de traitement et cadre réglementaire

La mise en regard des procédés en développement avec la réglementation en matière d'amiante fait apparaître de manière prégnante des difficultés juridiques.

La réglementation en matière d'amiante est éclatée entre les prescriptions du Code de l'environnement et les prescriptions du Code du Travail de la Santé ; même si cette situation répond bien à la différence d'objectifs qui existe entre ces deux codes, il n'en demeure pas moins qu'en pratique l'application croisée des prescriptions des deux codes dans le cadre d'une opération globale de désamiantage soulève des difficultés.

En effet, à titre d'exemples :

- Concernant le déchet issu du traitement d'un déchet amianté (sortie de procédé), le seuil réglementaire de concentration de 0.1 % d'une substance reconnue comme étant

cancérogène, des catégories 1 ou 2 (propriété HP7 – cancérogène) sert de base juridique pour justifier d'un classement en déchet dangereux au regard de la réglementation des déchets du Code de l'Environnement.

- En revanche, les prescriptions du Code de la Santé et du Travail ne fournissent pas de prescriptions applicables en matière de risques sanitaires (du même niveau d'exigence que les valeurs d'émission de fibres mises en œuvre lors des opérations de désamiantage) pour apprécier les potentialités d'émission de fibres des déchets issus du traitement.

De même, si la réglementation en matière d'émission de fibres encadre les opérations sur les sites même de désamiantage, il n'existe pas pour les sites dédiés au traitement de déchets amiantés de prescriptions contraignantes (de nature à garantir un niveau similaire de protection des personnes) applicables aux opérations de dépotage, préparation et introduction dans des procédés de conversion thermo chimique des déchets amiantés étudiés.

Ainsi aujourd'hui, même si le procédé INERTAM ou d'autres procédés spécifiques sont travaillés pour permettre d'atteindre le « zéro fibre » la mesure et l'appréciation de cette performance de traitement ne fait pas actuellement l'objet de prescriptions réglementaires spécifiques.

*Concernant les **technologies de traitement des déchets des autres matériaux FMA** les principaux enseignements de l'étude sont les suivants :*

Laine de verre

L'analyse des procédés de valorisation montre que la qualité du gisement est essentielle et nécessite une collecte sélective et un tri à la source très strict, ainsi qu'un contrôle à réception. Pour ces raisons techniques et économiques, le recyclage de la laine de verre (déchets de chantier) reste anecdotique.

Laine de roche

La société ROCKWOOL, un des leaders dans la fabrication de laine de roche a développé le programme ROCKCYCLE pour le recyclage de ses produits.

Bien que les volumes soient aujourd'hui anecdotiques, Rockwool considère que le recyclage reste un enjeu stratégique (directive européenne). Même si la société n'envisage pas à cours terme la reprise de déchets de démolition elle ne se prive pas de s'y intéresser à plus long terme.

Fibres Céramiques réfractaires (FCR)

La société Valoref du groupe saint Gobain est spécialisée dans le recyclage de tous matériaux réfractaires. A ce titre ils offrent des solutions globales de gestion de déchets issus de la déconstruction de fours verriers. L'entreprise travaille en partenariat avec des entreprises de déconstruction. Les méthodologies mises en œuvre sont identiques à celles d'un chantier de désamiantage.

Le recyclage concerne les matériaux réfractaires formant la structure des fours (Briques, Alumine/Zircon... etc) qui sont recyclés en matières premières secondaires.

En revanche les FCR conditionnées en big bags (avec EPI... etc comme pour les déchets amiantés) sont traités en Installation de Stockage de Déchets. Il n'existe pas de solution de recyclage pour ce type de déchet qui représente une fraction anecdotique des 40 000 tonnes de déchets traités annuellement.

4.2 Perspectives

Les investigations et analyses réalisées dans le cadre de cette étude ont permis à RECORD d'identifier les principaux freins à l'émergence de nouvelles solutions de traitement des déchets de matériaux fibreux en fin de vie, et en particulier de déchets contenant de l'amiante :

- **Le caractère complexe et la diversité des déchets amiantés**

Alors que l'amiante est composée de seulement deux grandes catégories de familles de minéraux (les Amphiboles et les Serpentes), les déchets amiantés sont constitués eux d'amiante associé à un support de composition très variable (plâtre, plastiques, béton, métaux,...) et dans des proportions éminemment variables.

Cette variabilité intrinsèque des flux de déchets contenant de l'amiante est aujourd'hui difficile à appréhender pour les développeurs de nouveaux procédés de traitement.

Elle induit également des difficultés pour échantillonner et caractériser les déchets amiantés.

En effet, il est rappelé qu'actuellement en matière de caractérisation analytique la détermination des concentrations en fibres d'amiante en suspension dans l'air est réalisée dans le cadre de la norme NF X 43-050 de janvier 1996 relative à la détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META). Cette norme est réputée satisfaire aux exigences de l'Arrêté du 14 août 2012 relatif aux conditions de mesurage des niveaux d'empoussièrement, aux conditions de contrôle du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle aux fibres d'amiante et aux conditions d'accréditation des organismes procédant à ces mesurages.

Or, cette méthode de détermination des dimensions, de la nature et des concentrations en fibres d'amiante ne peut pas différencier les fibres individuelles issues d'amphiboles asbestiformes de celles issues d'autres variétés non asbestiformes du même minéral amphibole.

Comme cela a été mentionné dans le cadre de la problématique des granulats de travaux publics, à l'heure actuelle, l'application de la norme NFX 43-050 ne permet pas de faire la différenciation entre les fibres d'amiante et les fragments de clivage issus du même minéral.

En effet, la désignation de fibre d'amiante, telle que définie dans la norme, répond à l'application des critères morphométriques et non pas à une identification du faciès du minéral : pour l'application de l'Arrêté du 14 août 2012, sont prises en compte toutes les fibres d'amiante dont la longueur est supérieure à 5 microns, la largeur est inférieure à 3 microns et dont le rapport longueur sur largeur est supérieure à 3.

De plus, il n'y a pas de limite inférieure aux dimensions des fibres d'amiante qui peuvent être détectées par la méthode normée mais dans la pratique, les microscopistes n'ont pas tous la même habileté à détecter les fibres d'amiante les plus courtes. En conséquence, seules les fibres de longueur supérieure à 0,5 mm sont prises en compte dans l'expression des résultats.

- **La structure et le contenu éclatés de la réglementation applicable aux déchets contenant de l'amiante**

La réglementation en matière d'émission de fibres encadre les opérations sur les sites même de désamiantage ; en revanche, il n'existe pas pour les sites dédiés au traitement de déchets amiantés de prescriptions contraignantes (de nature à garantir un niveau similaire de protection des personnes) applicables aux opérations de dépotage, préparation et introduction dans des procédés de conversion thermo chimique des déchets amiantés étudiés.

Autre aspect important, le seuil réglementaire de concentration de 0.1 % d'une substance reconnue comme étant cancérigène, des catégories 1 ou 2 (propriété HP7 – cancérigène) sert de base juridique pour justifier d'un classement en déchet dangereux au regard de la réglementation des déchets du Code de l'Environnement de déchets contenant de l'amiante.

Or compte tenu de ses objectifs, le Code de la Santé Publique et du Travail s'appuie lui, pour formuler ses prescriptions en matière de protection des opérateurs de désamiantage, sur le classement de toutes les fibres d'amiante comme des cancérrogènes certains, quelle que soit leur type minéralogique, (classement du Centre international de recherche sur le cancer - CIRC).

Il résulte de ces incohérences juridiques, liées aux différences d'objectifs (légitimes) poursuivis par les deux codes, des zones d'ombre réglementaires qui en l'état actuel peuvent porter préjudice au développement de nouvelles solutions de traitement des déchets amiantés.

- **Le poids économique de la phase de désamiantage par rapport à celle de traitement du déchet contenant de l'amiante**

L'étude avait comme axe de développement prioritaire les procédés de traitement des déchets amiantés tant dans leur dimension technique qu'économique.

Or les travaux réalisés dans le cadre de l'étude ont mis en évidence la faible part du coût de traitement des déchets contenant de l'amiante dans le coût global des opérations de désamiantage.

Il en résulte actuellement une priorisation des actions de recherche et développement sur les procédés de désamiantage par rapport aux solutions de traitement.

- **L'acceptabilité de certains procédés au regard des problèmes de santé publique liés à l'amiante**

L'acceptabilité de nouveaux procédés de traitement dédiés mais aussi de l'acceptabilité d'un recours aux procédés industriels ouverts (cimenteries, aciéries) pour traiter les déchets amiantés pose la question de l'encadrement réglementaire de la mesure de la teneur en fibre et de l'interprétation de la mesure.

La problématique de la mesure mérite d'être appréhendée aussi bien en amont pour qualifier le 0,1% de teneur en amiante des déchets contenant de l'amiante qui a pour conséquence leur classification en déchet dangereux, qu'en aval pour qualifier la teneur « 0 fibre » du produit issu du traitement des déchets d'amiante.

Ces différents freins constituent pour RECORD autant de champs d'investigation pour la poursuite des travaux menés dans le cadre de la présente étude.

ANNEXES

Table de figures

Figure 1 Schéma de l'approche générale de l'étude.....	12
Figure 2 Présentation des différentes familles de fibres (complétée à partir de TIMA, 1991).....	13
Figure 3 Forme moléculaire du silicate hydraté.....	15
Figure 4 Tableau comparatif des tailles de cations par rapport à l'anion superoxyde.....	16
Figure 5 Classement des variétés d'amiante.....	16
Figure 6 Structure Chimique du chrysotile.....	17
Figure 7 La formation feuillet.....	17
Figure 8 Vue au microscope électronique à transmission, sur une section perpendiculaire à l'axe des fibres.....	17
Figure 9 Structure moléculaire des amphiboles.....	18
Figure 10 Pénétration dans le système respiratoire selon le diamètre des fibres.....	14
Figure 11 Présentation des différentes familles de fibres (complétée à partir de TIMA, 1991).....	23
Figure 12 Pénétration dans le système respiratoire selon le diamètre des fibres Erreur ! Signet non défini.	
Figure 13 Fibres de chrysotile en microscopie électronique à balayage x 1000 (Photo CSTB).....	26
Figure 14 Tableau de dénomination des fibres d'amiante selon les critères dimensionnels.....	27
Figure 15 Pictogramme Danger Amiante.....	28
Figure 16 Tableau de classification des différentes formes d'amiante par le Centre international de recherche sur le cancer.....	28
Figure 17 Tableau de composition chimique actuelle des fibres constituant les laines minérales (Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014).....	29
Figure 18 Tableau de teneurs en éléments chimiques exprimées en pourcentages massiques pour différentes fibres de verre à usage spécial.....	30
Figure 19 Tableau de coefficient de dissolution (K_{dis}) de plusieurs fibres dans les cellules (pH 4,5) et dans le milieu extracellulaire (pH 7,4).....	30
Figure 20 Synthèse des caractéristiques physiques et chimiques des FMN et FMA (Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014).....	31
Figure 21 Photo microscopique de la fibre céramique et pictogramme de danger.....	32
Figure 22 Fibres céramiques réfractaires en microscopie électronique à balayage x 1000 (Source : ANSES. Rapport relatif aux FCR et fibres de verre à usage spécial 2007).....	33

Figure 23 Exemples de niveaux d'exposition à l'amiante (<i>Source : CARSAT</i>)	34
Figure 24 Empoussièrément en fibres lors du retrait de matériaux	35
Figure 25 Répartition des différentes fibres d'amiante lors d'opérations sur matériaux amiantés ...	35
Figure 26 Niveaux d'exposition aux fibres lors des divers stades du cycle de vie des produits en laine minérale manufacturée (<i>Source : FILMM, Livre blanc : laines minérales et santé, Edition 2014</i>)	36
Figure 27 Niveaux d'exposition aux fibres céramiques réfractaires.....	37
Figure 28 Étiquetage réglementaire pour les produits contenant de l'amiante	41
Figure 29 Equipements de protection	42
Figure 30 Tableau d'estimation de l'âge des linéaires (en 2002) (<i>Source : Cador, J-M. Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002</i>).....	45
Figure 31 Tableau d'estimation des linéaires nationaux par matériaux (en 2002) (<i>Source : Cador, J-M. Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002</i>).....	46
Figure 32 Tableau d'hypothèses de travail retenues pour l'estimation du renouvellement (en 2002) (<i>Source : Cador, J-M. Le patrimoine en canalisations d'AEP en FRANCE – Bilan des huit enquêtes départementales et estimation nationale, Université de Caen Basse-Normandie, GEOPHEN, UMR LETG 6554 CNRS, mars 2002</i>)	47
Figure 33 Vue d'ensemble du site de la Centrale Thermique de Richemont (<i>Source : EDF</i>).....	53
Figure 34 Vues de différents équipements donnant un aperçu de la complexité des situations d'accès aux équipements et ouvrages à désamianter (<i>Source : EDF</i>).....	54
Figure 35 Abattage à l'explosif des cheminées de la centrale de Richemont (<i>Source : EDF</i>).....	55
Figure 36 Grignotage des cheminées de la centrale de Cordemais (<i>Source : EDF</i>).....	56
Figure 37 Exemple de sas de confinement des ouvrages à désamianter (<i>Source : EDF</i>).....	60
Figure 38 Vue d'ensemble du site du Crédit Agricole (<i>Source : OCCAMAT</i>).....	67
Figure 39 Détail d'une façade (<i>Source : OCCAMAT</i>)	67
Figure 40 Détail d'un joint structure métallique de façade / surface vitrée (<i>Source : OCCAMAT</i>) ...	67
Figure 41 Le chantier de déconstruction réalisé par SERPOL (<i>Source : SERPOL</i>).....	71
Figure 42 Zone curée prête pour les opérations de désamiantage (<i>Source : SERPOL</i>).....	72
Figure 43 Revêtement bitumineux (<i>Source : SERPOL</i>).....	74
Figure 44 Double couche de faïence (<i>Source : SERPOL</i>)	74
Figure 45 Isolement avec bâche thermo soudée (<i>Source : SERPOL</i>).....	74
Figure 46 Forme moléculaire du silicate hydraté	85

Figure 47 Tableau comparatif des tailles de cations par rapport à l'anion superoxyde	86
Figure 48 Classement des variétés d'amiante	86
Figure 49 Structure Chimique du chrysotile.....	87
Figure 50 La formation feuillet	88
Figure 51 Vue au microscope électronique à transmission, sur une section perpendiculaire à l'axe des fibres	88
Figure 52 Structure moléculaire des amphiboles.....	88
Figure 53 Tableau de composition idéale des Amphiboles (<i>Source : Kirk - Othmer / Encyclopedia of Chemical Technology (Vol 3) 3^{eme} édition</i>)	89
Figure 54 Tableau des points de fusion par rapport au type d'amiante	91
Figure 55 Tableau de décompositin thermique par rapport au type d'amiante	91
Figure 56 Composition minéralogique du clinker	100
Figure 57 Tableau des mots clés de la recherche et leurs résultats.....	109
Figure 58 Tableau statistique - Origine des brevets	110
Figure 59 Tableau des procédés thermiques et thermochimiques utilisés	111
Figure 60 Historique de publication des brevets.....	112
Figure 61 Critères de classement des procédés	113
Figure 62 Le four solaire d'Odeilo - France	115
Figure 63 Tableau d'analyse des brevets sélectionnés	116
Figure 64 Schéma de principe du procédé ARI Technologies	121
Figure 65 Schéma de principe du réacteur HR 200.....	125
Figure 66 Schéma de principe du MOS	126
Figure 67 Synoptique procédé Neo Eco Recycling - Amiante.....	128
Figure 68 Synoptique procédé Neo Eco Recycling – Amiante-Ciment.....	129
Figure 69 Schéma de principe du traitement des déchets amiantés	134
Figure 70 Photo de l'usine INERTAM (Morcens-33).....	136
Figure 71 Le procédé de vitrification au plasma (<i>Source : Inertam</i>)	137
Figure 72 Coulée de COFALIT	138
Figure 73 Tableau des brevets entrant dans le cadre de l'étude.....	144

L'essentiel bibliographique

Relatif aux fibres d'amiante

Toxicologie et effets sanitaires

- Afsset. *Les fibres courtes et les fibres fines d'amiante*. Février 2009
- Bernstein DM. *The health risk of chrysotile asbestos*. *Curr Opin Pulm Med*. 2014 Jul;20(4):366-70.
- INRS. *Fiche toxicologique. Amiante*. FT 145. 2009
- INRS. *Tableau des maladies professionnelles liées à l'amiante*. 2000
- Mery É, Hommell-Fontaine J, Capovilla M, Chevallier A, Bibeau F, Croce S, Dartigues P, Kaci R, Lang-Averous G, Laverriere MH, Leroux-Broussier A, Poizat F, Robin N, Valmary-Degano S, Verrièle-Beurrier V, Villeneuve L, Isaac S. *Peritoneal malignant mesothelioma: review and recent data*. *Ann Pathol*. 2014 Feb;34(1):26-33. doi: 10.1016/j.annpat.2014.01.004. Epub 2014 Feb 11.
- Nielsen LS, Baelum J, Rasmussen J, Dahl S, Olsen KE, Albin M, Hansen NC, Sherson D. *Occupational asbestos exposure and lung cancer--a systematic review of the literature*. *Arch Environ Occup Health*. 2014;69(4):191-206.
- IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. *Arsenic, metals, fibres and dusts*. Volume 100C. A review of human carcinogens. 2012. 501 p.

Expologie

- Anses. *Évaluation de l'efficacité des moyens de protection collective et des équipements de protection individuelle vis-à-vis de l'exposition des travailleurs aux fibres courtes et fibres fines d'amiante*. Novembre 2011
- Anses. *Synthèse scientifique et technique sur les expositions professionnelles à l'amiante Rapport d'expertise*. Mai 2011
- Assemblée Nationale. *Rapport sur les risques et les conséquences de l'exposition à l'amiante*. 2006
- Bayram M, Bakan ND. *Environmental exposure to asbestos: from geology to mesothelioma*. *Curr Opin Pulm Med*. 2014 May;20(3):301-7.
- Goodman JE, Peterson MK, Bailey LA, Kerper LE, Dodge DG. *Electricians' chrysotile asbestos exposure from electrical products and risks of mesothelioma and lung cancer*. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2014 Feb;68(1):8-15.
- HAS. *Synthèse Exposition environnementale à l'amiante : état des données et conduite à tenir*. Janvier 2009.
- INRS. *Exposition à l'amiante dans les travaux d'entretien et de maintenance*. 2006 (2^{nde} éd.)
- INRS. *Situations de travail exposant à l'amiante*. 2007 (1^{ère} éd.)
- INRS (Eypert-Blaison C, Romero-Hariot A, Laine P, Veissière S, Fréville L, Starck M-C, Clerc F, Wild P.) *Use of a passive badge for sampling asbestos among building finishing workers*. Airmon 2014.

- INRS. *Exposition à l'amiante dans les travaux d'entretien et de maintenance*. 2006 (2nde éd.)
- INRS. *Situations de travail exposant à l'amiante*. 2007 (1^{ère} éd.)
- INRS. *Campagne de mesures d'exposition aux fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META). Synthèse des résultats et recommandations*. Août 2011.
- INRS (Eypert-Blaison C, Romero-Hariot A, Laine P, Veissière S, Fréville L, Starck M-C, Clerc F, Wild P.) *Use of a passive badge for sampling asbestos among building finishing workers*. Airmon 2014
- Clerc F, Eypert-Blaison C, Guimon M, Romero-Hariot A, Vincent R. *Campagne de mesures d'exposition aux fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META) Rapport final*. Août 2011
- Clerc F, Eypert-Blaison C, Guimon M, Romero-Hariot A, Vincent R. *Campagne de mesures d'exposition aux fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission analytique (META) Synthèse des résultats et recommandations*. Août 2011
- InVS. *Surveillance épidémiologique des effets de l'exposition à l'amiante: actualités françaises*. 2007

Gestion du risque et politiques publiques

- Assemblée Nationale. *Prise en charge des victimes de l'amiante : rapport d'information*. 2009
- Déoux S. *Bâtir pour la santé des enfants*. Medieco Editions, Eyrolles Diffusion. 2010. 689 p.
- Déoux S., Déoux P. *Le Guide de l'habitat sain*. 2^{ème} édition. Medieco Editions, Eyrolles Diffusion. 2004. 537 p.
- Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN). *L'amiante dans les bâtiments*. 2007
- Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN). *Bricolage dans votre logement Attention à l'amiante!*. Juillet 2010
- INRS. *Amiante Protection de la population*. Décembre 2013 (maj)
- INRS. *Amiante Protection des travailleurs*. Juillet 2013 (maj)
- INRS. *Exposition à l'amiante lors du traitement des déchets Guide de prévention*. Mars 2013 (3^{ème} éd.)
- INRS. *Travaux de retrait ou d'encapsulation de matériaux contenant de l'amiante Guide de prévention*. Décembre 2012
- INRS. *Travaux en terrain amiantifère Opérations de génie civil de bâtiment et de travaux publics Guide de prévention*. Septembre 2013 (1^{ère} éd.)
- Plan cancer 2009-2013
 - Mesure 9 : Améliorer l'observation et la surveillance des cancers liés à l'environnement professionnel. L'InVS estime entre 3 et 6 % la part des cancers liés au travail, soit entre 5 000 et 10 000 nouveaux cas par an. Parmi les cancers d'origine professionnelle dont les facteurs de risqué sont connus, plus de la moitié sont liés à l'exposition à l'amiante. Les mésothéliomes font l'objet d'un programme national de surveillance (PNSM) sur 22 départements et l'enregistrement exhaustif de tous les mésothéliomes incidents complétera utilement le Registre multicentrique national du mésothéliome pleural (Mesonat). Action 9.1 Rendre obligatoire la déclaration des mésothéliomes.
- Plan de santé au travail 2010-2014

- Exemple : Objectif 4 – Action 11 : améliorer les repérages de l’amiante avant travaux ou interventions de maintenance
- Plan national santé-environnement 2009-2013 (PNSE 2)
 - Action 10 : Réduire les expositions liées à l’amiante
 - Action 41 : Gérer les expositions à l’amiante environnemental
- Sénat (Archimbaud A., Barbier G., Deriot G., Deroche C., Godefroy J-P., Kerdraon R., Vanlerenberghe J-M., Watrin D. *N°668 Rapport d’information fait au nom de la commission des affaires sociales sur le suivi de la mission d’information de 2005 sur l’amiante*. Enregistré à la Présidence du Sénat le 1^{er} juillet 2014
- Sénat (Dériot G., Godefroy J-P.) *N°37 Rapport d’information fait au nom de la mission commune d’information sur le bilan et les conséquences de la contamination par l’amiante*. Annexe au procès-verbal de la séance du 20 octobre 2005
- Société française de médecine du travail. *Suivi médical de personnes exposées à l’amiante*. 2008
- Andeva. *Suivi médical post-professionnel par scanner (Normandie, Rhône-Alpes, Aquitaine)*. 2006

Valeurs de référence

- VLEP – 8h : 100 fibres/litre (abaissé à 10 fibres/litre au 1^{er} juillet 2015)
- Niveau d’empoussièrement à partir duquel le propriétaire doit faire procéder à des travaux de retrait ou de confinement des matériaux fixés dans la liste A : 5 fibres/litre. Le Sénat, dans son rapport 2014, préconise d’abaisser ce seuil à 0,47 f/l, rejoignant la position de l’Anses.

Normes

- NF X46-010 Août 2012 Travaux de traitement de l’amiante - Référentiel technique pour la certification des entreprises - Exigences générales - Certification des entreprises réalisant des travaux de traitement de l’amiante
- NF X46-011 Août 2012 Travaux de traitement de l’amiante - Modalités d’attribution et de suivi des certificats des entreprises

Textes réglementaires

- DIRECTIVE 2009/148/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 30 novembre 2009 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à une exposition à l’amiante pendant le travail

Code de la santé publique

- Articles L.1334-12-1 à L.1334-17 (Lutte contre la présence d’amiante)
- Article L.1337-4 (Dispositions pénales)
- Articles R.1334-14 à R.1334-29 (Exposition à l’amiante dans les immeubles bâtis)
- Articles R.1337-2 à R.1337-5 (Exposition à l’amiante dans les immeubles bâtis - Dispositions pénales)

Décrets

- Décret n° 2013-594 du 5 juillet 2013 relatif aux risques d’exposition à l’amiante

- Décret n° 2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante
- Décret n° 2012-47 du 16 janvier 2012 complétant la liste des maladies faisant l'objet d'une transmission obligatoire de données individuelles à l'autorité sanitaire
- Décret n° 2011-629 du 3 juin 2011 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis
- Décret n° 2009-1547 du 11 décembre 2009 relatif au suivi médical post-professionnel des agents de l'Etat exposés à l'amiante
- Décret n° 2008-101 du 31 janvier 2008 créant un groupe de travail national « amiante et fibres » (*modifié par le décret n° 2010-344 du 31 mars 2010*)
- Décret n° 2006-1653 du 21 décembre 2006 relatif aux durées de validité des documents constituant le dossier de diagnostic technique et modifiant le code de la construction et de l'habitation
- Décret n° 2006-1114 du 5 septembre 2006 relatif aux diagnostics techniques immobiliers et modifiant le code de la construction et de l'habitation et le code de la santé publique
- Décret n° 2006-1089 du 30 août 2006 modifiant le décret n° 95-260 du 8 mars 1995 relatif à la commission consultative départementale de sécurité et d'accessibilité
- Décret n° 2006-1072 du 25 août 2006 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis et modifiant le code de la santé publique (dispositions réglementaires)
- Décret n°2006-761 du 30 juin 2006 relatif à la protection des travailleurs contre les risques liés à l'inhalation de poussières d'amiante et modifiant le code du travail
- Décret n° 2001-1316 du 27 décembre 2001 modifiant le décret n° 96-1133 du 24 décembre 1996 relatif à l'interdiction de l'amiante, pris en application du code du travail et du code de la consommation
- Décret n° 2001-840 du 13 septembre 2001 modifiant le décret n° 96-97 du 7 février 1996 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis et le décret n° 96-98 du 7 février 1996 relatif à la protection des travailleurs contre les risques liés à l'inhalation de poussières d'amiante
- Décret n° 97-855 du 12 septembre 1997 modifiant le décret no 96-97 du 7 février 1996 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis
- Décret n° 96-1133 du 24 décembre 1996 relatif à l'interdiction de l'amiante, pris en application du code du travail et du code de la consommation
- Décret n° 96-97 du 7 février 1996 relatif à la protection de la population contre les risques sanitaires liés à une exposition à l'amiante dans les immeubles bâtis (modifié par le décret du 3 mai 2002 et du 24 décembre 2002) (abrogé par décret n° 2003-462 du 21 mai 2003 relatif aux dispositions réglementaires des parties I, II et III du code de la santé) Codifié dans le code de la santé publique
- Décret n° 88-466 du 28 avril 1988 relatif aux produits contenant de l'amiante

Arrêtés

- Arrêté du 8 avril 2013 relatif aux règles techniques, aux mesures de prévention et aux moyens de protection collective à mettre en oeuvre par les entreprises lors d'opérations comportant un risque d'exposition à l'amiante
- Arrêté du 7 mars 2013 relatif au choix, à l'entretien et à la vérification des équipements de protection individuelle utilisés lors d'opérations comportant un risque d'exposition à l'amiante

- Arrêté du 21 décembre 2012 relatif aux recommandations générales de sécurité et au contenu de la fiche récapitulative du « dossier technique amiante »
- Arrêté du 14 décembre 2012 fixant les conditions de certification des entreprises réalisant des travaux de retrait ou d'encapsulation d'amiante, de matériaux, d'équipements ou d'articles en contenant
- Arrêté du 12 décembre 2012 relatif aux critères d'évaluation de l'état de conservation des matériaux et produits de la liste A contenant de l'amiante et au contenu du rapport de repérage
- Arrêté du 12 décembre 2012 relatif aux critères d'évaluation de l'état de conservation des matériaux et produits de la liste B contenant de l'amiante et du risque de dégradation lié à l'environnement ainsi que le contenu du rapport de repérage
- Arrêté du 14 août 2012 relatif aux conditions de mesurage des niveaux d'empoussièrement, aux conditions de contrôle du respect de la valeur limite d'exposition professionnelle aux fibres d'amiante et aux conditions d'accréditation des organismes procédant à ces mesurages
- Arrêté du 23 février 2012 définissant les modalités de la formation des travailleurs à la prévention des risques liés à l'amiante
- Arrêté du 12 mars 2012 relatif au stockage des déchets d'amiante
- Arrêté du 19 août 2011 relatif aux modalités de réalisation des mesures d'empoussièrement dans l'air des immeubles bâtis
- Arrêté du 19 août 2011 relatif aux conditions d'accréditation des organismes procédant aux mesures d'empoussièrement en fibres d'amiante dans les immeubles bâtis
- Arrêté du 5 novembre 2010 abrogeant l'arrêté du 2 décembre 2002 relatif à l'exercice de l'activité et à la formation des contrôleurs techniques et techniciens de la construction effectuant des missions de repérage et de diagnostic de l'état de conservation des matériaux et produits contenant de l'amiante en application du décret n° 96-97 du 7 février 1996 modifié
- Arrêté du 30 juillet 2009 modifiant l'arrêté du 3 février 2008 portant nomination au groupe de travail national amiante et fibres
- Arrêté du 3 février 2008 portant nomination au groupe de travail national « amiante et fibres »
- Arrêté du 21 novembre 2006 définissant les critères de certification des compétences des personnes physiques opérateurs de repérage et de diagnostic amiante dans les immeubles bâtis et les critères d'accréditation des organismes de certification
- Arrêté du 28 juillet 2005 relatif à la collecte et à la transmission des informations nécessaires pour le suivi de l'application de la réglementation relative à l'amiante dans les établissements de santé, sociaux et médico-sociaux
- Arrêté du 23 décembre 2004 portant agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures de la concentration en poussières d'amiante des immeubles bâtis
- Arrêté du 6 mars 2003 relatif aux compétences des organismes procédant à l'identification d'amiante dans les matériaux et produits
- Arrêté du 30 décembre 2002 relatif au stockage de déchets dangereux
- Arrêté du 2 décembre 2002 relatif à l'exercice de l'activité et à la formation des contrôleurs techniques et techniciens de la construction effectuant des missions de repérage et de diagnostic de l'état de conservation des matériaux et produits contenant de l'amiante en application du décret n° 96-97 du 7 février 1996 modifié
- Arrêté du 22 août 2002 relatif aux consignes générales de sécurité du dossier technique « amiante », au contenu de la fiche récapitulative et aux modalités

d'établissement du repérage, pris pour l'application de l'article 10-3 du décret n° 96-97 du 7 février 1996 modifié

- Arrêté du 2 janvier 2002 relatif au repérage des matériaux et produits contenant de l'amiante avant démolition en application de l'article 10-4 du décret n° 96-97 du 7 février 1996 modifié
- Arrêté du 21.12.1998 relatif aux conditions d'agrément des organismes habilités à procéder aux mesures de la concentration en poussières d'amiante des immeubles bâtis.
- Arrêté du 15.01.1998 relatif aux modalités d'évaluation de l'état de conservation des faux-plafonds contenant de l'amiante et aux mesures d'empoussièrement dans les immeubles bâtis
- Arrêté du 07.02.1996 relatif aux modalités d'évaluation de l'état de conservation des flocages et des calorifugeages contenant de l'amiante et aux mesures d'empoussièrement dans les immeubles bâtis

Sites internet

- www.andeva.fr
- www.anses.fr
- www.e-cancer.fr
- www.fiva.fr
- www.has-sante.fr
- www.inrs.fr
- www.invs.sante.fr
- www.legifrance.gouv.fr
- www.sante.gouv.fr/direction-generale-de-la-sante-dgs.html
- www.travail-emploi.gouv.fr
- www.who.int/fr

L'essentiel bibliographique

relatif aux fibres minérales artificielles (FMA)

Toxicologie et effets sanitaires

- Fireman E. *Man-made mineral fibers and interstitial lung diseases*. Curr Opin Pulm Med. 2014 Mar;20(2):194-8.
- IARC. *Arsenic, Metals, Fibres and Dusts*. Volume 100 C. 2012.
- IARC. *Man-made Vitreous Fibres*. Volume 81. 2002.
- IARC. *Man-Made Mineral Fibres and Radon*. Volume 43. 1988.
- INRS. *Fibres de verre à usage spécial. Fiche toxicologique*. FT 268. 2007

Expologie

- Afsset. *Les fibres minérales artificielles siliceuses – Fibres céramiques réfractaires. Fibres de verre à usage spécial. Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs*. Avril 2007
- Boffetta P, Donaldson K, Moolgavkar S, Mandel JS. *A systematic review of occupational exposure to synthetic vitreous fibers and mesothelioma*. Crit Rev Toxicol. 2014 May;44(5):436-49. doi: 10.3109/10408444.2014.899558.
- InVS. *Éléments techniques sur l'exposition professionnelle aux fibres minérales artificielles*. Février 2012
- INRS. *Exposition aux fibres céramiques réfractaires lors de travaux d'entretien et de maintenance*. Décembre 2010

Gestion du risque et politiques publiques

- Déoux S. *Bâtir pour la santé des enfants*. Medieco Editions, Eyrolles Diffusion. 2010. 689 p.
- Déoux S., Déoux P. *Le Guide de l'habitat sain*. 2^{ème} édition. Medieco Editions, Eyrolles Diffusion. 2004. 537 p.
- INRS. *Fibres céramiques réfractaires Isolation et protection thermique en milieu industriel*. Guide de prévention. ED 6085. Avril 2011
- INRS. *Les laines minérales d'isolation. Bonnes pratiques d'utilisation. Fiche pratique de sécurité*. ED 93. Septembre 2013
- INRS. *Les fibres céramiques réfractaires. Fiche pratique de sécurité*. ED 109. Février 2008

Valeurs de référence

- INRS. *Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France*. ED 984, 2012.
- INRS, ED 984, Décembre 2007. Valeur Limite (VL) indicative pour les fibres de laitier, de roche et de verre : 1 fibre/ml (cm^3) pour 8 heures d'exposition/jour, 5 jours/semaine)
- Décret n°2007-1539 du 26 octobre 2007 fixant des valeurs limites d'exposition professionnelle contraignantes pour certains agents chimiques et modifiant le code du travail → VLEP pour les fibres céramiques réfractaires : 0,1 fibre/ cm^3 depuis le 01/07/2009 (valeur contraignante).

Textes réglementaires

- Code du travail, art. R-4412-1 à R-4412-22 : dispositions générales relatives à la prévention des risques chimiques. Ces articles s'appliquent pour la laine de laitier, la laine de verre et la laine de roche.
- Décret n°2007-1539 du 26 octobre 2007 fixant des valeurs limites d'exposition professionnelle contraignantes pour certains agents chimiques et modifiant le code du travail
- Arrêté du 26 octobre 2007 relatif à la méthode de mesure à mettre en oeuvre pour le contrôle de la valeur limite d'exposition professionnelle relative aux fibres céramiques réfractaires
- Arrêté du 26 octobre 2007 modifiant l'arrêté du 30 juin 2004 modifié établissant la liste des valeurs limites d'exposition professionnelle indicatives en application de l'article R. 232-5-5 du code du travail

Normes

- [NF B20001 et NF/EN/ISO 9229 \(septembre 2007\) définissent les termes de laines minérales](#)
- Norme XP X43-269 Avril 2012: Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META - Comptage par MOCP

Sites internet

- www.andeva.fr
- www.anses.fr
- www.invs.sante.fr
- www.inrs.fr
- www.legifrance.gouv.fr
- www.who.int/fr

L'essentiel bibliographique

relatif à une corrélation entre amiante dans l'eau de distribution et cancer

➤ **Etudes n'ayant pas conclu à une corrélation entre amiante dans l'eau de distribution et cancer :**

- Andersen A, Glattre E, Johansen BV. Incidence of cancer among lighthouse keepers exposed to asbestos in drinking water. *Am. J. Epidemiol*, 1:138(9):682-7 (1993).
- Browne ML, Varadarajulu D, Lewis – Michl EL, Fitzgerald EF. Cancer incidence and asbestos in drinking water, Town of Woodstock, New York, 1980-1998. *Environ Res*. 98(2):224-32 (2005).
- Fiorenzuolo G, Moroni V, Cerrone T, Bartolucci E, Rossetti S, Tarsi R. Evaluation of the quality of drinking water in Senigallia (Italy), including the presence of asbestos fibres, and of morbidity and mortality due to gastrointestinal tumours. *Jg Sanita Pubbl*. 69(3):325-39 (2013).
- Harrington, J.M., Craun, G.F., Meigs, J.W., Landrigan, P.J., Flannery, J.T. et Woodhull, R.S. An investigation of the use of asbestos cement pipe for public water supply and the incidence of gastrointestinal cancer in Connecticut 1935-1973. *Am. J. Epidemiol.*, 107: 96 (1978).
- Levy, B.S., Sigurdson, E., Mandel, J., Laudon, E. et Pearson, J. Investigating possible effects of asbestos on city water: surveillance of gastrointestinal cancer in Duluth, Minnesota. *Am. J. Epidemiol.*, 103: 362 (1976).
- Mason, T.J., McKay, E.W. and Miller, R.W. Asbestos-like fibres in Duluth water supply: relation to cancer mortality. *J. Am. Med. Assoc.*, 228: 1019 (1974).
- Meigs, J.W., Walter, S.D., Heston, J.F., Millette, J.F., Craun, G.F., Woodhull, R.S. et Flannery, J.T. Asbestos cement pipe and cancer in Connecticut 1955-1974. *J. Environ. Health*, 42: 187 (1980).
- Millette, J.R., Craun, G.F., Stober, J.A., Draemer, D.F., Tousignant, H.G., Hildago, E., Duboise, R.C. et Benedict, J. Epidemiology study of the use of asbestos-cement pipe for the distribution of drinking water in Escambia County, Florida. *Environ. Health Perspect.*, 53: 91 (1983).
- Polissar L, Severson RK, Boatman ES. Cancer risk from asbestos in drinking water : summary of a case-control study in western Washington. *Environmental Health Perspectives*. 53:57-60 (1983).
- Polissar L, Severson RK, Boatman ES, Thomas DB. Cancer incidence in relation to asbestos in drinking water in the Puget Sound region. *Am J Epidemiol*. 116(2):314-28 (1982).

• Sadler, T.D., Rom, W.N., Lyon, L.T. et Mason, J.O. The use of asbestos-cement pipe for public water supply and the incidence of cancer in selected communities in Utah, 1967-1976. Thèse, University of Utah, Salt Lake City, UT (1981).

• Sigurdson, E.E., Levy, B.S., Mandel, J., McHugh, R., Michienzi, L.J., Jagger, H. and Pearson, J. Cancer morbidity investigations: lessons for the Duluth study of possible effects of asbestos in drinking water. Environ. Res., 25: 50 (1981).

• Toft, P., Wigle, D.T., Méranter, J.C. et Mao, Y. Asbestos and drinking water in Canada. Dans : Water supply and health. H. van Lelyveld et B.C.J. Zoeteman (éditeurs). Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam. p. 77 (1981).

• Wigle, D.T. Cancer mortality in relation to asbestos in municipal water supplies. Arch. Environ. Health, 32: 185 (1977).

➤ **Etudes en faveur d'une corrélation entre amiante dans l'eau de distribution et cancer :**

• Mi J, Peng W, Jia X, Wei B, Yang L, Hu L, Lu R. A case-control study on the relationship of crocidolite pollution in drinking water with the risk of gastrointestinal cancer in Dayao County. Wei Sheng Yan Jiu. 44(1):28-32 (2015). → Conclusion : Related factors of drinking water in crocidolite-contaminated area in Dayao County were significantly associated with the mortality of gastrointestinal cancer.

• Kiaerheim K, Ulvestad B, Martinsen JI, Andersen A. Cancer of the gastrointestinal tract and exposure to asbestos in drinking water among lighthouse keepers (Norway). Cancer Causes Control. 16(5):593-8 (2005) → Conclusion : The results support the hypothesis of an association between ingested asbestos and gastrointestinal cancer risk in general and stomach cancer risk specifically.

**Etudes
animales**

L'essentiel bibliographique

**Etudes sur l'exposition à l'amiante par
ingestion ou contamination de l'eau**

• McConnell, E.E., Shefner, A.M., Rust, J.H. et Moore, J.A. Chronic effects of dietary exposure to amosite and chrysotile asbestos in Syrian golden hamsters. Environ. Health Perspect., 53: 11 (1983).

• McConnell, E.E., Rutter, H.A., Ulland, B.M. et Moore, J.A. Chronic effects of dietary exposure to amosite asbestos and tremolite in F344 rats. Environ. Health Perspect., 53: 27 (1983)

L'essentiel bibliographique

Concernant les propriétés physico-chimiques de l'amiante

- KIRK-OTHMER. « Encyclopedia of Chemical Technology Vol 3, 3ème édition. John Wiley and Sons, New York, 1978.
- Rappels sur la nature physicochimique des fibres d'amiante, leurs principales utilisations et leur comportement aérodynamique (INSERM)
www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/203/?sequence=6
- ✓ L'amiante : Document (version 1.0 – Novembre 2013) conçu et mis en forme par Christophe Lécuyer, Professeur à l'Université de Lyon et Membre Senior de l'Institut Universitaire de France
http://uved.univ-nantes.fr/sequence2/html/chap4_3.html
- ✓ Place de moyens d'origine minérale et d'extraction naturelle en thérapeutique : "Quelle argile utiliser en dermatologie" ?
<http://www.simepi.info/spip.php?article66>
- ✓ (Memento Roches et minéraux industriels – Amiante – Etude BRGM 96-G-185 – Septembre 1997) - <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RR-39406-FR.pdf>

L'essentiel bibliographique

Concernant les procédés de traitement

Procédé ARI-TECHNOLOGIES (Thermochimique)

- "ARI Technologies Inc , A technical Review" BNG America – RGG Holmes – 15/04/2005
- "Technology Assessment : Asbestos destruction using ARI's Thermochemical Conversion Technologie (TCCT)" BNFL Inc – Martin Biggs – 9/11/2004
- Final Report :Ten-Day Asbestos Destruction Demonstration using Thermochemical Conversion Technologie - ARI Technologies – 20/12/2007
- "STUDY INTO THE APPLICABILITY OF THERMOCHEMICAL CONVERSION TECHNOLOGY TO LEGACY ASBESTOS WASTES IN THE UK » Andrew Downey, British Nuclear Group / Dale M. Timmons, R.G., ARI Technologies, Inc - WM'05 Conference, February 27 - March 3, 2005, Tucson, AZ

Procédé VALMIANTE

- Perspective de valorisation de déchets d'amiante en zéolithe par des processus d'altération contrôlés – Synthèse projet VALMIANTE (ADEME – Oct 2008)

Autres procédés

- IRCOW - 7th Framework Program :D 5.2 (v1)_ATON _Report on CS3 – 14/01/2013

- Demonstration study of high temperature melting for asbestos-containing waste - Journal of Material Cycles and Wastes Management – Janvier 2013 – Vol 15 – Issue 1 – p 25-36)
- "Dissolution of fibrous silicates in acid and buffered salt solutions", Allen MP. and Smith R.W., Minerals Engineering, vol.7, 1527-1537 (1994).
- Caractérisation et étude de la performance du chrysotile dans la capture du CO₂ dans les procédés gaz-solide (Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval (Québec) dans le cadre du programme de maîtrise en génie chimique pour l'obtention du grade de Maître es sciences (M.Sc.) Insaf DALDOUL - 2009
- M. Fujishige, R. Sato, A. Kuribara, I. Karasawa, A. Kojima, CaCl₂ addition effect and melt formation in low-temperature decomposition of chrysotile with CaCO₃, J. Ceram. Soc. Japan 114 (2006) 844-848.
- M. Fujishige, R. Sato, A. Kuribara, I. Karasawa, A. Kojima, Low-temperature pyrolysis of crocidolite and amosite using calcium salts as a flux, J. Ceram. Soc. Japan 115 (2007) 434-439.
- BPEO For the Management of waste asbestos – Etude ERM – Irlande 2004
- Identification et analyse des différents procédés de traitement des déchets de matériaux contenant de l'amiante – Rapport Final CSTB Grenoble - 96
- Asbestos disposal and treatment options – EPRI – Ref EP 3006-02 – Final report – 1993
- BREF – Traitement des déchets – EC Aout 2006
- Guide Amiante – travaux relevant de la ss-section 3 et/ou ss-section 4 (FFB – Avril 2014
- Rapport d'information Sénat N° 668 – 01/07/2014
- Les filières de la déconstruction et du démantèlement – L'amiante en Basse Normandie – Alain Picquet - Novembre 2014
- Les avis de l'ADEME: Traitement des déchets par torche à Plasma – Septembre 2010

FMA

- ✓ Fiche Toxicologique Fibres de verre à usage spécial – FT 268 – édition 2007
- ✓ AFSSET : Les Fibres Minérales Artificielles : Evaluation de l'exposition de la population générale et des travailleurs – Janvier 2007
- ✓ AFSSET : Fiche 5 - Avis sur l'exposition aux FMA – Avril 2007
- FCR : Le point sur la toxicologie – Dc Magdeleine BROM-RULHMANN (Médecin Inspecteur du travail régional Alsace) – Février 2013
- Les FCR : De l'évaluation à la prévention des risques – Myriam RICAUD – CARSAT 04/02/2013
- Evaluation de la politique régionale relative aux parcs à conteneur : Etude réalisée par RDC Environnement pour les services publics de Wallonie (Avril 2012 – modifié en Mars 2013)

BREVETS

- Base WIPO – Patentscope / liste des brevets

Principaux contacts

- Florence Vacher (Resp Rockcycle) – ROCKWOOL – entretien téléphonique le 27/04/2015
- Dale Timmons (Technical Director – ARI GLOBAL Technologies) et Tony Windsor (Managing Director WISG) – échanges de mail / signature NDA / conférence téléphonique le 20/4/2015
- Yoann CARTERON (Resp QHSE – VALOREF) entretien téléphonique 26/08/2015
- Laurent Chateau (ADEME) – entretien téléphonique le 18/06/2015
- Christian BORE (SOMEZ) – entretien téléphonique le 16/09/2014
- Christophe Deboffe (DG neo-Eco Recycling) – RDV sur site le 08/10/2014 – entretiens téléphoniques 10/2014 ; 06/2015 ; 09/2015)
- Fabrice COPIN (Directeur environnement ATILH)– entretiens téléphoniques le 12/12/2014 et 25/03/2015
- Joelle Carpena (CEREGE) – RDV le 29/07/2014
- Jean Philippe CARPENTIER (Président groupe IRAM) – entretien téléphonique le 23/01/2015
- Daniel Joubert (TECHME) – entretien téléphonique le 15/01/2015 et échanges de mail Mars 2015
- Michel Bonfils (SME) – Visite site le 19/02/2015
- Franck Busillet (Directeur commercial INERTAM) – Visite de site le 29/10/2014
- Patrick Guiraud (Directeur Délégué – Génie Civil / CIM BETON) – rencontre Décembre 2014
- Richard David (Occamat – Démolition) – rencontre le 02/06/2015
- Dr. Ryszard Parosa (ATON-HT) – échanges de mail Aout 2014
- Emmanuel CORTES (UBIFRANCE Japon – Bureau de tokyo) – entretien téléphonique le 13/01/2015
- Tony Nocito (ABCOV) – échanges de mail Aout 2014 – signature NDA
- Tanigaki Nobuhiro (NSENGI – procédé DMS) – échanges mail Mai 2015