

NEUTRALISATION DES DANGERS INHÉRENTS AUX DÉCHETS D'AMIANTES ET PERSPECTIVES DE VALORISATION

Projet VALMIANTE 2

Janvier 2015

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par la Société SOMEZ SARL

N° contrat : 1006C0066

Coordination technique : CHATEAU Laurent
Direction Economie Circulaire et Déchets, Service Mobilisation et Valorisation des Déchets



SYNTHESE

REMERCIEMENTS

Le Dr Robert-Charles REGIS adresse ses remerciements à :

- Dr. Valérie GEOFFROY
- Dr. Julien HAINES
- Dr. Olivier CAMBON
- Dr. Christian BORE
- Dr. Wilfrid BALMER
- Dr. Yvonne VAQUER

Qui ont apporté leurs contributions nécessaires au projet VALMIANTE 2.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Laurent CHATEAU – SOMEZ - 2016 Neutralisation des dangers inhérents aux déchets d'amiantes et perspectives de valorisation – Synthèse – 29 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

A retenir

Le projet VALMIANTE 2 vise un traitement global de tous les déchets amiantés par des procédures chimiques et de biologiques à bilan carbone minimal, très proches des conditions thermodynamiques normales, en visant une valorisation des produits de traitement, en particulier sur l'obtention de sels ou d'oxydes de Magnésium (à usages agronomiques) dénués de métaux lourds, à partir des déchets contenant des chrysotiles et sur la production de nanomatériaux proches des ciments (Tobermorites et CSH) doués de pouvoir de prélèvement importants en milieu aqueux sur des cations divalents et trivalents souvent inaccessibles aux zéolithes.

De manière plus opérationnelle, les 3 objectifs du projet Valmiant 2 étaient les suivants :

1. Etendre les résultats de Valmiant 1 à toutes les catégories de déchets amiantés (flocage, fibro-ciment, dalles vinyl-amiante) que ce soit par la nature de l'amiante ou par la diversité des formes et des fonctions. Ce qui implique la détection *a priori* de la nature des déchets traités, variétés et formes ;
2. Proposer des techniques de détection permettant de distinguer les différents types d'amiante (chrysotile, amphiboles) ;
3. Déterminer des procédures d'inhibition et de valorisation, ayant un faible impact sur l'environnement et économiquement acceptables, basées sur des voies chimiques, biologiques ou couplées.

S'agissant de la détection des différents types d'amiante

Les résultats obtenus sur la détection des différents types de fibres d'amiantes par l'absorption infrarouge et la diffusion Raman, montrent que l'on peut faire mieux que les appareils portatifs existant (ex : Phazir), tant au niveau de la sélectivité que de la sensibilité. Le stade de la conception d'un nouvel appareil dans le cadre d'une collaboration industrielle pourrait être envisagé.

S'agissant du traitement des différents types de déchets d'amiante

Les résultats obtenus confirment ceux de Valmiant 1, à savoir que le chrysotile peut être dissout à température ambiante dans une solution acide *ad hoc*. L'investigation d'une technique biologique d'extraction *in situ* du magnésium, obtenue en soumettant des micro-organismes spécifiques, les sidérophores, à une privation alimentaire en magnésium, montre des résultats prometteurs, présentant des avantages opérationnels notables par rapport à la voie chimique. Le traitement des amphiboles n'est réalisable qu'au prix d'une altération hydrothermale classique, mais coûteuse en énergie, en temps et en surface. Des optimisations restent possibles.

Pour les fibrociments, le traitement est possible mais sa transposition à l'échelle industrielle reste subordonnée à un broyage préalable très coûteux en énergie et à une séparation maximale entre les fibres et la phase cimentaire.

S'agissant de la valorisation des produits de traitement

La valorisation des produits solides du traitement du chrysotile sous forme de composés à haute valeur ajoutée (CSH, tobermorite, zéolithes) est possible. La synthèse de CSH, bien adaptés à la demande de dépollution des fluides industriels et/ou des eaux de procédés contenant des cations polyvalents, est la plus simple et la plus intéressante du point de vue économique et environnemental.

En revanche, la valorisation des déchets solides issus du traitement des amphiboles serait limitée à des usages comme charges minérales ou fillers en construction, à condition de s'assurer du respect des critères techniques et environnementaux *ad hoc*.

Le recyclage des eaux de procédés est rendu possible par la récupération du magnésium dans la phase liquide et l'extraction des métaux (Ni, Cr, etc.).

TABLE DES MATIÈRES

A retenir	3
I - Introduction.....	6
II - Distinction entre chrysotile et amphibole	6
III - Détection et caractérisation des amiantes	7
IV - Inhibition de la dangerosité des Amiantes.....	9
IV.1 - Inhibition de la dangerosité du chrysotile	9
IV.2 - Inhibition de la dangerosité des amphiboles	10
V - Les matériaux composites amiantés	10
V.1 - Les fibrociments.....	11
V.2 - Composites divers	11
VI - Valorisation des déchets de Chrysotile	11
VI.1 - Bilan massique pour un déchet brut homogène.....	12
VI.2 - Bilan massique pour un déchet de flocage hétérogène	12
VII - Valorisation des déchets de flocages	13
VII.1 - Synthèses des tobermorites normales et aluminées.....	13
VII.2 - Synthèse des Silicates de Calcium Hydratés (CSH).....	14
VIII - Inhibition et valorisation par voies biologiques	15
VIII.1 – Extraction des métaux en présence de chélateurs.....	15
VIII.2 - Inhibition de la dangerosité des amphiboles	16
VIII.3 - Inhibition de la dangerosité des chrysotiles.....	16
XI - Première approche pour un pilote semi-industriel	16
XII – Conclusions et Perspectives.....	18

Liste des figures :

Figure 1 : Photographies d'écran du Phazir en fonction de la détection (à gauche) ou non de la présence d'amiante (à droite)	8
Figure 2 : Spectroscopie infrarouge identifiant le chrysotile et l'amosite	8
Figure 3: Diagramme de diffraction des rayons X illustrant le caractère amorphe d'un échantillon de fibro-ciment contenant uniquement des fibres de chrysotile après traitement acide.	10
Figure 4 : Phase solide dure (SD) à gauche et Phase solide cotonneuse (SC) à droite	12
Figure 5 : Diagramme de phase des différents matériaux	13
Figure 6 : Diagramme de diffraction de la tobermorite.....	13
Figure 7 : Pourcentage de nickel fixé par les CSH en fonction de la quantité de NaCl.....	14
Figure 8 : Evolution de la concentration en fer prélevé des amiantes (CHR, chrysotile, CRO crocidolite, AMO, amosite) broyées (b) ou non broyé par le sidérophore bactérien (pyoverdine) en fonction du temps	15
Figure 9 : Schéma de principe du pilote version 2011	17

Liste des abréviations :

AMO : Amosite
AMP : Amphibole
ARO : All Reflecting Objective
ATR : Réflexion Totale Atténuée
CHR : Chrysotile
CRO : Crocidolite
CSH : Silicates de Calcium Hydratés
DBO : Demande Biologique en Oxygène
EDAX : Energy Dispersive X-ray Analysis
EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra Acétique
FC : Filière chaude
FF : Filière froide
ITGA : Institut Technique des Gaz et de l'Air
MEB : Microscopie Electronique à Balayage

I - Introduction

L'objectif du projet VALMIANTE 2 était de vérifier la faisabilité scientifique au laboratoire d'un procédé de traitement de déchets d'amiante basé sur des procédures chimiques et de biologiques tout en intégrant des objectifs de valorisation des matières obtenues.

Cela revient à mettre en œuvre les perspectives de recherche issues du projet VALMIANTE 1¹ mené entre 2006 et 2007 par la société SOMEZ (convention ADEME 0606C0023) et des travaux complémentaires menés ensuite par SOMEZ avec l'établissement Public du Campus de Jussieu. Pour mémoire, la première synthèse publiée par SOMEZ en 2008 faisait état de deux résultats très importants. Le premier était l'inhibition des nuisances spécifiques que représentent les déchets de chrysotile (Amiante blanche). Les investigations s'étaient cantonnées aux déchets les plus dangereux, du fait de la facilité avec laquelle ils se délitent (flocages) et de leur emploi intensif dans la vie quotidienne² (bruts, compacts, domestiques ou industriels), à l'état pratiquement pur (à plus de 95%).

Le second était la valorisation des matières issues du traitement ces déchets. A l'issue de l'attaque acide, la phase liquide est une source de magnésium que l'on peut exploiter par des traitements chimiques appropriés. Pour la phase solide, il faut distinguer deux cas :

- le résidu solide ne contient que des traces de calcium (cas des produits bruts, compacts) : Valmiant 1 a montré que par l'altération hydrothermale, la synthèse des zéolithes d'excellente qualité était possible ;
- la phase solide contient des quantités notables de calcium (cas des déchets de flocage) : la synthèse de zéolithes n'est plus possible. C'était là l'un des arguments majeurs pour la réalisation de Valmiant 2.

Suite à la découverte de la présence d'amosite dans un déchet de flocage provenant des chantiers de Jussieu, il est apparu important d'inclure le traitement des amphiboles dans Valmiant 2. D'où la nécessité dorénavant de connaître avant traitement la composition des déchets et particulièrement la présence d'amphiboles en plus du chrysotile.

Une innovation introduite par le projet Valmiant 2 est l'extraction des métaux de transition (fer, chrome, nickel ...) dont la présence pose problème concernant le recyclage des eaux de procédé. Pour ce faire, a été introduit en tête de procédé un traitement dans lequel interviennent des sidérophores d'origine bactérienne. L'introduction d'une dimension biologique au traitement a provoqué une bifurcation nette au sein même de la séquence de déstructuration du chrysotile.

L'ultime extension des travaux aux plus courants des composites contenant de l'amiante, les fibrociments (plaques et tuyaux), a clôturé un programme ambitieux.

Les objectifs opérationnels, en regard desquels cette synthèse est structurée et les résultats présentés sont les suivants :

- Développer une méthode de détection rapide et fiable du type d'amiante,
- Inhiber la dangerosité spécifique des amphiboles utilisées industriellement (Amosites et Crocidolites) qui contiennent du Fer (Ferreux et/ou Ferrique) de structure, par la destruction de leurs structures cristallines,
- Développer une méthode d'extraction du Fer et autres métaux lourds contenus dans les déchets d'amiante, en amont du procédé VALMIANTE 1,
- Améliorer la transformation des déchets complexes (Chrysotile-gypse) et Amosite, simple ou complexes (ex. amiante-ciment) par une altération hydrothermale conduisant à des CSH (voire tobermorite) valorisables,
- Proposer une évaluation la plus précise possible des caractéristiques de mise en œuvre industrielle et des bilans matière et environnemental du procédé.

II - Distinction entre chrysotile et amphibole

¹ <http://www.ademe.fr/perspectives-valorisation-dechets-damiante-zeolithes-processus-dalteration-controllee>

² Avant leur interdiction en 1997.

Une forte majorité d'acteurs n'utilisent que le seul terme générique d'amiante (Asbestos), sans faire la distinction entre le chrysotile et les amphiboles. Cela n'est pas sans conséquences gênantes dans les traitements et dans les effets sanitaires de l'exposition des personnels.

Le chrysotile, issu des roches serpentines, est constitué de fibres minérales que l'on désigne sous le nom d'amiante blanche. Il existe aussi des minéraux fibreux, issus des roches amphiboles, que l'on désigne, dans le monde industriel, sous le même nom d'amiantes, brunes pour les amosites, bleues pour les crocidolites ou blanches pour les trémolites, de là peuvent naître des confusions regrettables. Les deux ont des compositions chimiques différentes, mais appartiennent au même groupe cristallographique, ce qui accroît la confusion. C'est la différence de leurs textures, qui implique des propriétés chimiques quasiment opposées.

Les fibres de chrysotile présentent une texture en "cigare" résultant de l'accrochage de deux plans l'un dit de brucite constitué par de l'hydroxyde de magnésium, l'autre étant uniquement silicique. Des différences de tension de surface font que le premier apparaît à la surface des fibres. Cela explique à la fois que le pH de surface du chrysotile soit très élevé et que ses fibres soient très sensibles aux attaques acides.

Au contraire, la surface externe des fibres d'amphiboles est analogue à celle du quartz, ce qui la rend insensible aux attaques acides, sauf à l'acide fluorhydrique. Seule une altération hydrothermale prolongée dans une solution basique chaude permet donc la destruction des amphiboles (cf. résultats de Valmiente 1).

Qu'il s'agisse d'enfouissement, ou d'inhibition par déstructuration ou encore de valorisation, il convient de distinguer entre le chrysotile (amiante blanche) et l'ensemble des seules amphiboles fibreuses que sont les amosites (amiante brune) et les crocidolites (amiante bleue) à usage industriel. C'est la première opération à faire, car elle orientera la suite des traitements vers des filières fondamentalement différentes.

Le chapitre suivant présente les résultats de techniques de détection de ces différents types d'amiante.

III - Détection et caractérisation des amiantes

Comme cela a été précédemment évoqué, il convient de repérer la nature des amiantes (chrysotile, amphibole ou mélange chrysotile-amphibole), en tête de procédé industriel. Pour cela, les techniques jouant sur les fréquences visibles et infrarouges des différentes liaisons intracristallines des deux variétés ont été utilisées.

Par ailleurs, les résultats obtenus ont été comparés à ceux obtenus à l'aide du Phazir, seul appareil portatif existant sur le marché. C'est un spectromètre infrarouge miniaturisé (spectrométrie d'infrarouge proche dite NIR).

La comparaison montre que les résultats du Phazir sont globalement satisfaisants. Il présente cependant quelques points faibles qui sont soulignés ci-dessous. Le plus important est qu'il ne permet pas de distinguer entre l'amosite et la crocidolite. En effet, cet appareil a donné des réponses négatives pour la crocidolite et l'amosite natives en présence de chrysotile (cf. figure 1).

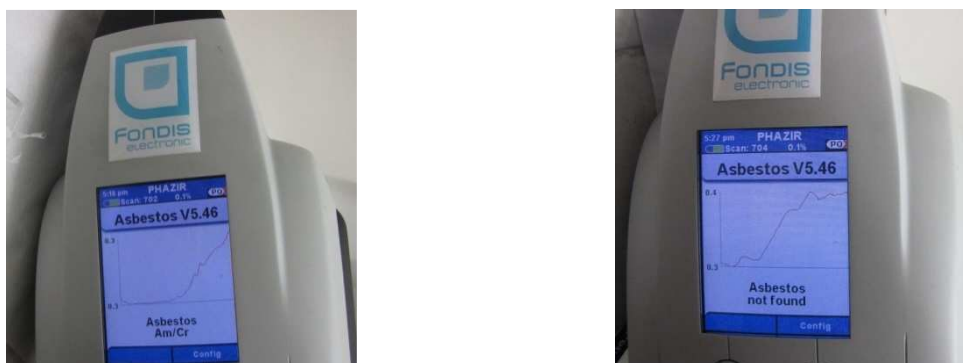


Figure 1 : Photographies d'écran du Phazir en fonction de la détection (à gauche) ou non de la présence d'amiante (à droite)

Des échantillons de chrysotile, d'amosite, de crocidolite ont été caractérisés par diffraction des rayons X et par MEB avec analyse EDAX, moyens d'analyse massifs et statiques, ainsi que par des techniques de spectroscopie optique.

Les méthodes de spectroscopie optique employées ont recours à la fois l'effet Raman et l'absorption dans le proche et moyen infrarouge selon deux techniques ATR et ARO, ce qui apporte une sensibilité supérieure au Phazir. A ce niveau celle du Phazir est insuffisante et cela se confirme lors de l'étude des déchets de flocage. Deux échantillons issus des chantiers de Jussieu correspondent respectivement à des mélanges chrysotile+calcite, (réf. JCC1), et gypse+amosite (réf. JAG3), le chrysotile ayant été extrait de ce dernier suivant le protocole de Valmianté1.

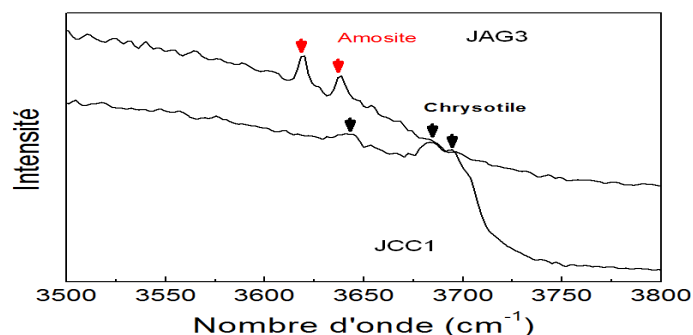


Figure 2 : Spectroscopie infrarouge identifiant le chrysotile et l'amosite

La spectroscopie infrarouge identifie le chrysotile et l'amosite dans tous les cas (cf. figure 2). L'amosite n'a été identifiée clairement que par la technique ARO. Cette phase n'a été détectée ni aux rayons X, ni observée au MEB.

A l'issue de ces avancées, il est envisagé d'installer à l'entrée du procédé Valmianté un détecteur qui trierait entre chrysotile et amphiboles quelles que soient les variétés présentes dans le déchet.

IV - Inhibition de la dangerosité des Amiantes

IV.1 - Inhibition de la dangerosité du chrysotile

Les structures caractérisant les chrysotiles sont entièrement détruites lorsqu'elles sont immergées au moins 30 jours dans une solution d'acide sulfurique ($N \geq 4$), à la température ambiante et à pression atmosphérique, sans agitation.

Ce résultat de Valmiant 1 reste valable lorsqu'il s'adresse à des déchets hétérogènes comme les déchets de flochage de Jussieu, qui contiennent de grandes quantités de solides non amiantés ($\approx 40\%$ en masse) et dont le chrysotile ($\approx 30\%$) est intimement mélangé au gypse ($\approx 30\%$) ou encore à d'autres composites ne contenant que du chrysotile.

A condition de pouvoir maintenir un pH acide pendant un temps suffisamment long, les couches de brucite du chrysotile se délitent. La concentration en magnésium dans l'eau augmente et la solubilité diminue. Pour entretenir la réaction il faut, soit une grande quantité d'eau acidifiée, soit disposer d'un ligand qui prélève le magnésium dans le milieu réactionnel. Le choix de l'acide est alors décisif autant par la nature de son anion que par le niveau de sa force.

Le dosage du magnésium dans la solution en fin d'attaque est donc une mesure décisive. Pour paramétrer la perte en magnésium les auteurs utilisent l'indice MLD (Magnesium Leaching Degree), défini comme la "Variation différentielle" évaluée en %, de la concentration en MgO au cours de l'attaque acide.

$$MLD = 100 \times [C_i (MgO) - C_f (MgO)] / C_i (MgO)$$

De nombreux travaux ont montré qu'à partir d'une valeur de 80 % les effets néfastes du chrysotile sur des animaux disparaissent. Cependant, même l'obtention de 100 % n'est pas un critère suffisant d'évaluation de la disparition complète de l'amiante blanche, car il n'est pas rare de trouver du magnésium dans des matériaux accompagnants le chrysotile dans les déchets. Ainsi, seront retenus comme critères absolus de disparition des fibres cristallisées à l'issue des traitements que :

1. un diagramme de diffraction de type amorphe ou,
2. l'absence de taches spécifiques dans un diagramme de diffraction des électrons tel qu'on le pratique dans des laboratoires agréés comme ceux d'ITGA.

De nombreux acides ont été utilisés, ils se distinguent par leur force et par l'efficacité de leur ligand à prélever le magnésium. Selon ce dernier critère l'acide oxalique est le mieux placé, mais les acides chlorhydrique et nitrique sont les plus cités. Au-delà des résultats acquis dans Valmiant 1, les résultats brevetés par l'INSIACET de Toulouse ont été vérifiés : si l'on traite à l'acide nitrique HNO_3 concentré (10 N) pendant 4 jours à température ambiante, un échantillon de fibro-ciment ne contenant que des fibres de chrysotile, on obtient une phase solide absolument amorphe comme le montre le diagramme de diffraction des rayons X (cf. figure 3).

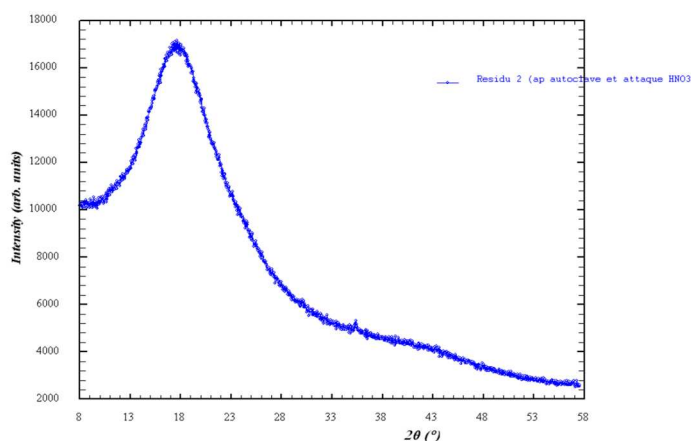


Figure 3 : Diagramme de diffraction des rayons X illustrant le caractère amorphe d'un échantillon de fibro-ciment contenant uniquement des fibres de chrysotile après traitement acide.

La question de la dangerosité des déchets de composite ciment-chrysotile est en principe complètement résolue. Cependant les échantillons de fibrociments sont broyés à une granulométrie de 1 - 2 mm. Compte tenu des tonnages en jeu, qui sont de l'ordre du million de tonnes en France, la dissolution préalable à bas prix de la matrice (composée à ~95% de ciment !) constitue la vraie question quant à la faisabilité industrielle de ce procédé breveté.

IV.2 - Inhibition de la dangerosité des amphiboles

Dans Valmiane 2, l'échantillon contenant de la crocidolite (caractérisé par des pics de diffraction à 10.60°, 19.74° et 28.80°) a été soumis à un traitement hydrothermal sodique [160°C, 10 Atm. 5 Jours]. A la sortie il n'y a plus de trace de crocidolite dans la phase solide (disparition du pic 10,60°). Le fer que contient la crocidolite se manifeste essentiellement dans la phase résiduelle liquide de couleur rouge sombre ce qui confirme bien la dissolution de la crocidolite dans l'attaque sodique à chaud.

Pour assurer la généralité du traitement hydrothermal sodique des amphiboles, il a été appliqué à des échantillons natifs d'amosite, et de trémolite. Celle-ci n'est pas utilisée dans l'industrie, mais on la trouve souvent en mélange avec les chrysotiles ou avec des minéraux industriels, (argiles, perlites... etc). Elle apparaît également dans des affleurements naturels particulièrement insalubres (Corse, Nouvelle Calédonie...). Toutes ces structures sont détruites et les solutions contiennent du Fer, sauf pour la trémolite.

Les structures caractérisant les amphiboles sont entièrement détruites lorsqu'elles sont soumises à une altération hydrothermale sodique dans des conditions [160 °C, 10 Atm., 5 jours] qui impliquent le confinement et une dépense énergétique importante.

V - Les matériaux composites amiantés

Le terme « composite » définit ici un matériau ouvré résultant du mélange volontaire et organisé d'au moins deux matériaux naturels ou synthétiques déjà connus et caractérisés.

Cette définition ne vise pas à l'exhaustivité, les déchets de flocage y émergent par l'aspect hétérogène de leur composition et le caractère volontaire de leur production. Les plus importants sont les fibrociments et l'ensemble des "divers", constitué par les polymères, résines, enduits, colles ... ainsi qu'une multitude de produits d'usage courant.

V.1 - Les fibrociments

Les déchets d'amiante-ciment sont générés par les travaux de démolition et de réhabilitation des bâtiments et de TP. La quantité de déchets de ce type, plaques ondulées, supports de tuiles, fausses ardoise, tuyaux... a été évaluée en France à 400 000 tonnes/ans, auxquelles faut ajouter 80 000 tonnes stockées à la suite de l'interdiction de 1976.

C'est la société Eternit qui a commercialisé ces produits en France et à l'international pendant plus de 20 ans. SOMEZ est en relation avec la société ayant repris les actifs de Eternit, qui affiche le désir de trouver une solution économiquement viable à l'annihilation de la dangerosité de ces déchets. Sous forme de communication privée, elle a donné les informations suivantes :

1. Les déchets plans ou ondulés ne contiennent que du chrysotile (10-15 %),
2. Les tuyaux d'adduction d'eau contiennent du chrysotile parfois renforcé par des fibres de crocidolite,
3. Les solutions préconisées par les brevets sont valables mais les brevets actuels ne satisfont pas aux critères économiques compte tenu des quantités de déchets à traiter et du coût de ces traitements, tout particulièrement concernant la contrainte du broyage de certains déchets tels que les fibro-ciments.

V.2 - Composites divers

Il existe des listes de produits contenant de l'amiante (ex : INRS). Elles illustrent la difficulté qu'il y a dans la saisie d'un tel sujet. On peut tout de même discerner une tendance forte, c'est celle des polymères armés. L'INRS fournit une liste de 68 types de polymère qui sont souvent mis en œuvre dans le BTP et l'industrie. Parmi eux 44 signalent la possibilité d'avoir des charges minérales contenant des amiantes.

Dans le bâtiment, en particulier industriel, les "Dalles Vinyle-amiante", souvent dans les salles de commande. Pour des raisons de pare-feux, plusieurs usages dans le nucléaire sont connus.

La volonté d'extraire les fibres d'amiante des matrices plastiques implique leur destruction soit par dissolution (solvant) soit par combustion en présence ou non d'oxygène (pyrolyse). Dans la plupart des cas, il y a manipulation et/ou dégagement de substances dangereuses.

Dans l'incapacité de donner un schéma unique de procédures pouvant convenir à une telle diversité, SOMEZ préconise une stratégie analogue à celle qui, dans la gestion des déchets nucléaires, consiste à considérer la masse de combustible usagé comme la première barrière de confinement.

La situation ici est moins difficile. Incrustées dans le polymère, les fibres d'amiante sont immobilisées, le polymère lui-même peut être considéré comme une première barrière de confinement durable et efficace si on ne la soumet pas à des contraintes thermo-mécano-chimiques fortes.

Cette première barrière peut être doublée par un enrobage adapté (résines, enduits, ciment ...). Ces polymères, qui présentent en général une température intermédiaire de moulage et entraîne une ductilité suffisante pour leur modelage et leur agglomération, pourraient être également utilisés.

Ce genre de procédure serait particulièrement adapté aux dalles plastiques amiantées légèrement radioactives que l'on prélève souvent dans les opérations de démantèlement.

VI - Valorisation des déchets de Chrysotile

Le second but, plus ambitieux, était de valoriser ces déchets. La phase liquide résultant du traitement, acide est une source de magnésium qu'il est possible d'exploiter par des traitements chimiques appropriés. Il faut distinguer deux cas, car le bilan massique global de l'attaque acide dépend de la nature du déchet traité. Il comprend deux ou trois étages selon qu'il est homogène ou non.

Les déchets dits bruts homogènes sont constitués d'isolants thermiques compacts, domestiques ou industriels, pratiquement purs. A plus de 95%, ils sont constitués par du chrysotile. Les déchets dit hétérogènes sont soit issus du déflocage soit des composites (fibrociments, dalles vinyl-amiante, etc.).

VI.1 - Bilan massique pour un déchet brut homogène

Pour un tel déchet (plaques isolantes, cordes, bourre, tissu...) qui ne contient que du chrysotile auquel s'ajoutent divers produits destinés à assurer la cohésion des fibres, on obtient deux phases, après attaque acide : l'une est liquide et l'autre est solide. Cela donne en poids :

Solide (53%) → SiO₂ (87,30%) + MgO (0,80 %) + Divers (12,5%)

Liquide (47 %) → SiO₂ (0,30 %) + MgO (88,2%) + Divers (11,5%)

Soit au global :

Déchet (100%) transformé en SiO₂ (47%) + MgO (29 %) + Divers (24 %)

La silice est bien localisée dans le résidu solide tandis qu'on retrouve près de 90 % de l'oxyde de magnésium en solution, soit 25 % du poids total du déchet.

Quant aux "divers", ils se répartissent presque à égalité entre les deux phases. On y retrouve du fer et quelques métaux lourds. On constate que le chrome va plutôt sur la phase solide, tandis que l'on retrouve une majorité de nickel en solution. Le reste est un ensemble de résidus organiques provenant des liants utilisés dans la confection des produits ouvrés à partir du chrysotile brut.

Dans le cas très favorable (cf. Valmianté 1) on dispose en final, dans le meilleur des cas, pour 100 kg de déchet initial, 40 Kg d'une silice amorphe de bonne qualité, très active conduisant aux zéolithes et 25,5 Kg de MgO.

La possibilité d'extraire les métaux de transition en tête de procédé grâce aux sidérophores, a pour résultat la production d'un MgO de très haute qualité (cf. § IX).

VI.2 - Bilan massique pour un déchet de flocage hétérogène

Cet exemple pris sur un déchet extrait des chantiers de Jussieu a été étudié dans Valmianté 1. Il est important car il a conduit à introduire un *distinguo* dans la phase solide pour tenir compte de l'hétérogénéité du déchet. Les deux photographies de la figure 4 illustrent les deux types de déchets solides qu'il est courant d'observer dans le flocage.

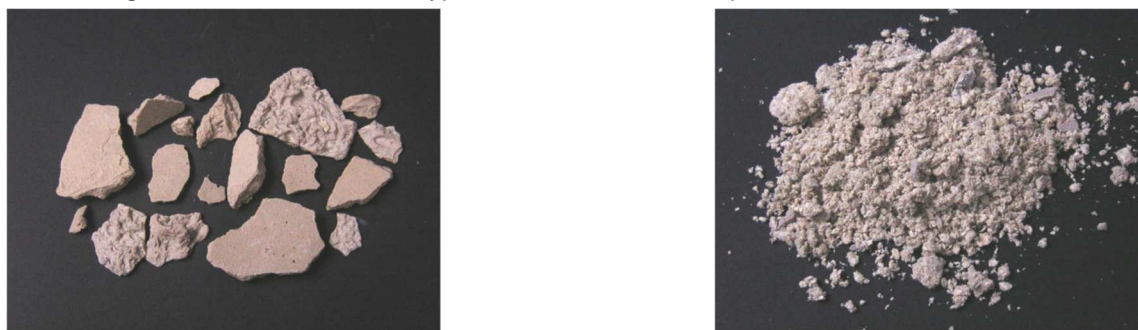


Figure 4 : Phase solide dure (SD) à gauche et Phase solide cotonneuse (SC) à droite

La **phase solide dure (SD)** est constituée en grande majorité par des plaques de ciment, plâtre ou enduit, de tailles très variables (0,5 - 10 cm), lisses sur une face, plus rugueuses, voire cavernueuses, sur l'autre, où se logent des fragments du flocage proprement dit.

La **phase solide cotonneuse (SC)** est un mélange "pelucheux" très "lâche" de chrysotile et de gypse identique à ceux qui ont été utilisés comme échantillon test dans les traitements acides. Il contient en outre des petits morceaux de SD < 0,4 cm. En fait, à l'examen visuel, ils ne paraissent pas nombreux car les SD ne sont pas des matériaux "brisants".

Déchet (100%) Phase SD (40%) → Phase SC (60%)

Avec SC (60%) → Gypse (30%) + Chrysotile (30%)

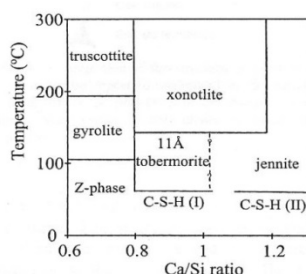
Analyse SC → SO₃ 18 % CaO 12 % Si O₂ 14 % MgO 9% Divers 7%

Le seul examen des déchets de Jussieu ne peut préjuger de l'état le plus fréquent des flocages, cependant d'après les professionnels, ils seraient assez représentatifs. A condition qu'ils soient acceptés en alvéole spécifique pour déchets amiantés en ISDND, l'élimination préalable de la phase SD serait satisfaisante.

Le déchet est de fait un composite beaucoup moins avantageux. La production d'oxyde de magnésium est juste inférieure à 10 %. De plus, la présence d'une concentration importante de calcium dans la phase solide interdit la synthèse de zéolithe.

VII - Valorisation des déchets de flocages

A cette fin, la synthèse de minéraux proches des ciments a été proposée puis développée. Ils rentrent en jeu, au moment où ceux-ci se solidifient (prise, cure...). Ce sont des Silicates de Calcium Hydratés (CSH) selon la nomenclature en cours dans le milieu des cimentiers où "C" signifie calcium "S", silicium et "H" eau. Le diagramme de phase de la figure 5 illustre l'ensemble des différents matériaux plus ou moins bien cristallisés en fonction de la température et des valeurs que peut prendre le rapport Ca/Si.



En principe, en dessous de 60°C on ne peut obtenir que des CSH amorphes de Ca/Si variables. Si le rapport Ca/Si < 0,8, on côtoie le domaine zéolitique.

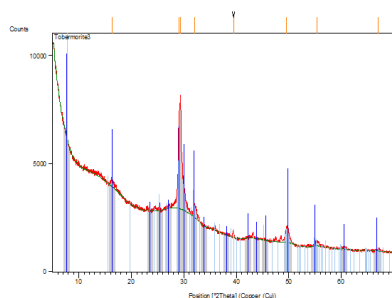
Si l'on inscrit ce rapport dans l'inégalité :

$$0,8 < \text{Ca/Si} < 1,0$$

alors au-dessus de 60°, on obtient une tobermorite 11 Å bien cristallisée.

Figure 5 : Diagramme de phase des différents matériaux

VII.1 - Synthèses des tobermorites normales et aluminées



Ce matériau, de structure feuilletée, proche de celle des argiles pontées, présente des versions correspondantes à des distances entre feuillets différentes de 9 Å, 11 Å et 14 Å suivant les conditions de synthèse.

Le diagramme de diffraction de la figure 6 est celui d'une tobermorite obtenue à partir de la phase solide résultant de l'attaque acide d'un chrysotile.

Figure 6 : Diagramme de diffraction de la tobermorite

Les tobermorites se synthétisent par altération hydrothermale d'un mélange de chaux et de silice dans des proportions convenables. de 60 et 180°C dans un réacteur étanche, non réactif et résistant aux pressions autogènes (≈

10 Atm), Dans la synthèse, l'apport de sodium va fournir à la fois les cations de compensation et l'énergie chimique nécessaire à l'altération hydrothermale (NaOH en solution 2N).

Au cours de la synthèse, on peut aussi introduire de l'aluminium qui apporte une capacité d'échange cationique supplémentaire comparable à celles des zéolithes. Mais ce sont vers les cations multivalents que la complémentarité aux zéolithes se manifeste, là où ces dernières sont bien moins efficaces.

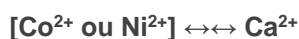
VII.2 - Synthèse des Silicates de Calcium Hydratés (CSH)

Les conditions de synthèse des tobermorites sont proches de celles des zéolithes. Elles nécessitent des températures au-dessus des conditions normales et surtout et elles impliquent une logistique de confinement peu propice aux solutions industrielles.

Sans aller jusqu'à la synthèse d'une tobermorite, on peut dans des conditions plus proches de la normale, obtenir des produits amorphes, les Silicates de Calcium Hydratés (CSH) aux propriétés très intéressantes. A la température ambiante et pour des valeurs du rapport Ca/Si telles que :

$$0,6 < \text{Ca/Si} < 1,2$$

Si l'on veut prélever dans une eau polluée des cations divalents, alcalino-terreux et/ou des métaux de transition (Co, Ni, Mn, Cr...), on constate que dans une tobermorite c'est par "substitution" des atomes de calcium de la structure que s'effectue le prélèvement. Avec des dynamiques plus lentes qu'au cours d'un échange classique sur un site *ad hoc* (4 à 5 jours), car il faut couper des liaisons Ca-O. Il s'agit là d'un cas plus proche d'une "substitution pseudomorphique" que d'un échange :



Les expériences réalisées sur le cobalt et le nickel ont donné d'excellents résultats après 24 heures de contact avec les CSH, les teneurs en Co et en Ni devenant quasi nulles dans les solutions, même en présence de NaCl (cf. figure 7). Les CSH, contrairement aux zéolithes, ne sont pas sensibles à la concurrence des alcalins.

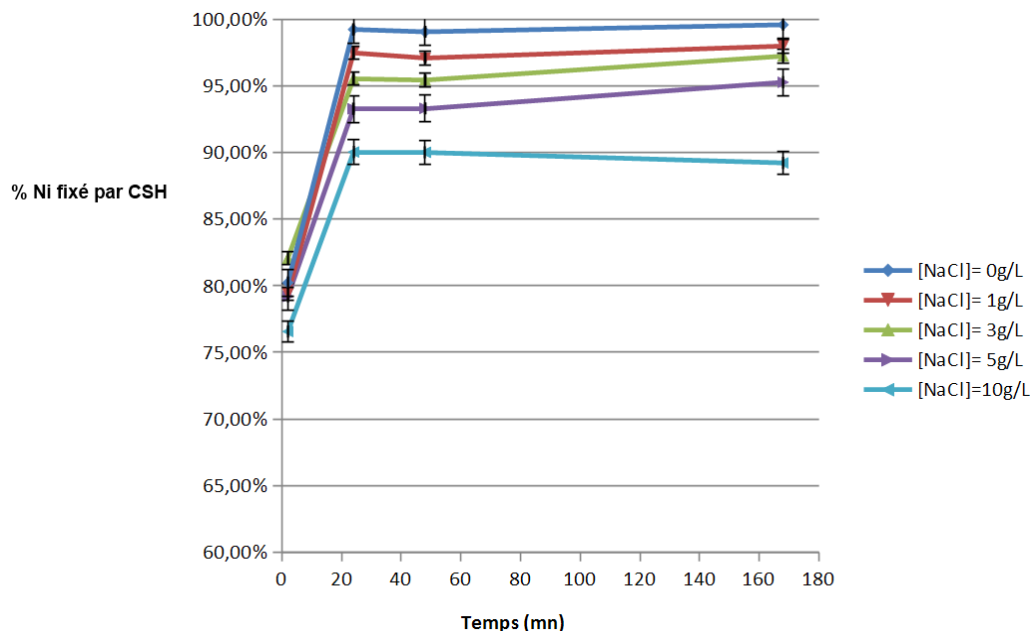


Figure 7 : Pourcentage de nickel fixé par les CSH en fonction de la quantité de NaCl

Les procédures de prélèvement qui mettent en jeu les CSH sont, *a priori*, plus simples, plus sûres et moins coûteuses en énergie que les procédures analogues sur tobermorite de même rapport Ca/Si. Ils ont de plus la propriété particulière de relâcher plus lentement les composés fixés du fait de leur forte tortuosité interne.

Le mélange initial (SiO₂ + CaO) provient ici de la phase solide issue de l'attaque acide d'un déchet Chrysotile-Gypse auquel on ajoute une petite quantité de silice afin que le rapport Ca/Si = 0,8. D'une manière générale, on peut

utiliser des mélanges de minéraux naturels ou recyclés. Si l'on veut obtenir une tobermorite aluminée, la solution élégante consiste à introduire Al par l'apport d'une zéolite A (Si/Al) = 1.

VIII - Inhibition et valorisation par voies biologiques

Dans Valmiane, le domaine biologique (biotique, biotope...) est défini par la présence de micro-organismes vivants participant à des modifications voulues au sein d'un réacteur *ad hoc*, c'est à dire entretenant la vie des micro-organismes et entretenant leur activité spécifique désirée.

Cette voie de développement s'inspire de travaux italiens sur l'action des lichens sur les affleurements naturels.

VIII.1 – Extraction des métaux en présence de chélateurs

Dans cette expérience, l'influence de trois paramètres sur trois amiantes natives (chrysotile, amosite et crocidolite) ont été évaluées :

- le broyage,
- la nature du chélateur chimique (EDTA) ou biologique (Pyoverdine),
- la durée des cycles biologiques d'interaction sur les amiantes.

Une première réponse attendue était de savoir si le broyage pouvait améliorer l'altération des matériaux mais également de déterminer l'efficacité de prélèvement des métaux par les chélateurs biologiques (sidérophores) ou chimiques (EDTA). Un sidérophore est une molécule ayant une haute affinité pour les métaux et qui est excrétée dans le milieu extérieur par un micro-organisme afin de subvenir à ses besoins en fer principalement. La deuxième réponse attendue était de déterminer la durée du traitement (48 H ou 96 H) la plus efficace et de savoir si les cycles successifs de contact entre les complexants et les amiantes améliorent l'efficacité des prélèvements.

Après 48H de contact des amiantes en présence de pyoverdine, sidérophore produit par la souche de *P. aeruginosa* 6297, on observe un changement de couleur du jaune au brun dans l'essai, signifiant que la pyoverdine a complexé un métal et ce, quel que soit le matériau testé (amosite, crocidolite ou chrysotile). Ce changement de couleur est plus important dans le cas des amiantes broyées.

La pyoverdine présente un rendement d'extraction supérieur à celui du complexant chimique (EDTA) pour le chrysotile et la crocidolite. Pour l'amosite, la quantité de fer extraite par la pyoverdine et l'EDTA est similaire que les échantillons soient broyés ou non. A chaque cycle, des quantités similaires de fer ont été extraites en présence de l'un ou l'autre de ces chélateurs (Figure 6).

Dans le cas du chrysotile la présence de fer dans les surnageants est surprenante compte tenu que cette amiante ne contient pas de fer dans sa structure cristalline $[Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4]$. Néanmoins, ce résultat confirme ceux obtenus dans le précédent projet Valmiane 1 où du fer avait été trouvé en forte quantité. Il s'agit sans doute d'oxyhydroxydes ou d'oxydes de fer adsorbés à la surface des fibres.

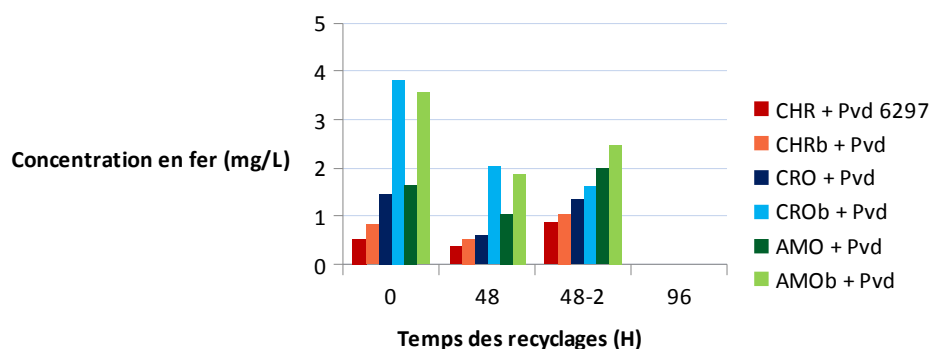


Figure 8 : Evolution de la concentration en fer prélevé des amiantes (CHR, chrysotile, CRO crocidolite, AMO, amosite) broyées (b) ou non broyées par le sidérophore bactérien (pyoverdine) en fonction du temps

Les sidérophores sont des complexants biologiques meilleurs que l'EDTA, complexant chimique pourtant performant. Ils peuvent extraire le fer et les métaux de transition comme le chrome et le nickel. Cette extraction est favorisée par un broyage préalable.

Ce résultat est important car cette extraction, placée en tête de filière, permettra l'assainissement inorganique des eaux de procédé, ce qui signifie un gain d'un ordre de grandeur des possibilités de recyclage de ces eaux. Ceci constitue un net progrès vis à vis du projet Valmiant 1.

VIII.2 - Inhibition de la dangerosité des amphiboles

Que ce soit en présence des sidérophores ou de bactéries productrices de sidérophores, en présence d'acides organiques, sur des échantillons natifs, plus ou moins broyés, ou des déchets floqués, on constate qu'il y a une solubilisation de fer à partir des fibres d'amiantes. Cependant, une optimisation est encore nécessaire afin de tester si une destruction totale des structures est réalisable pour voie biologique. Les projections expérimentales nécessaires ont conduit à l'abandon (provisoire ?) de cette voie de recherche.

Les investigations se sont donc focalisées sur le traitement biologique des chrysotiles. Ce traitement est fondé sur le besoin essentiel des bactéries en magnésium afin de satisfaire une croissance bactérienne optimale (cf. §VIII.3).

VIII.3 - Inhibition de la dangerosité des chrysotiles

Cette voie consiste à priver de magnésium des bactéries sélectionnées, en espérant qu'elles iront le prélever à la structure chrysotile. La cinétique de croissance bactérienne en Milieu Minimum sans magnésium [MM-Mg], montre que *Pseudomonas aeruginosa* est incapable de se multiplier sans source de magnésium, tandis que la croissance de *P. aeruginosa* en Milieu Minimum (MM) contenant du magnésium redevient tout à fait normale, montrant que la présence de magnésium restaure bien la croissance bactérienne.

On peut donc affirmer que la croissance de *P. aeruginosa* est un marqueur de l'extraction du magnésium lorsqu'il en est privé, c'est à dire en [MM-Mg]

En présence d'un déchet de flocage tel que le chrysotile-gypse, on observe en MM-Mg une croissance stimulée dix fois par rapport à celle dans le MM-Mg sans déchet, croissance identique aux témoins (MM), indiquant bien que la bactérie puise le magnésium dont elle a besoin pour sa croissance à partir des déchets amiantés.

Ce résultat très intéressant confirme l'hypothèse de départ et conforte dans l'idée que la voie biologique détériore les fibres du matériau. Des cycles supplémentaires ont été réalisés sur le déchet de flocage en question, pour déterminer le nombre de cycles nécessaires afin d'épuiser la couche de brucite et d'atteindre un niveau d'altération ne permettant plus la croissance bactérienne par manque de magnésium disponible. La figure 9 présente la quantité de magnésium présente dans le milieu de culture entre les cycles 13 à 16. Après 16 cycles, la croissance est ralentie, ce qui concordant avec la diminution de la quantité de magnésium dans le milieu.

Pour la valorisation des phases liquides, toujours en se limitant au traitement des chrysotiles, les interventions biologiques, réduisant les volumes et améliorant la qualité, facilitent l'extraction du magnésium. Mais, même si celle-ci doit être complétée par une attaque acide d'ampleur réduite, la pollution des eaux de procédés resterait faible et de nature organique, facilement réduite au sein du procédé global.

Cette estimation est acceptable pour FF qui s'applique parfaitement aux chrysotiles purs ou sous forme de flocage, sujet initial de Valmiant 1 et à un degré moindre aux déchets de fibrociment si l'on découvre un moyen autre que le broyage mécanique pour les réduire à une granulation convenable.

Le cas des amphiboles reste à poursuivre afin de limiter la durée de l'altération hydrothermale utilisées ici (160°C, 10 Atm, 5 jours). Dans tous les cas, une analyse économique plus fine sera nécessaire, avec pour limite les tarifs actuels de la filière de vitrification.

XI - Première approche pour un pilote semi-industriel

Le schéma global de principe proposé au démarrage du projet, pour le procédé global, est présenté ci-dessous.

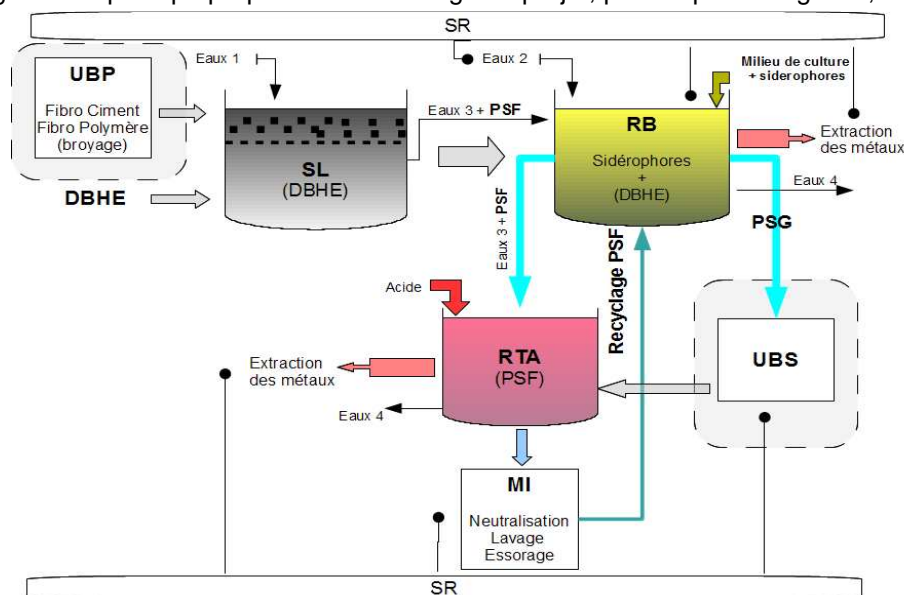


Figure 9 : Schéma de principe du pilote version 2011

Seuls les équipements des étapes essentielles sont repérés :

SR	Site de reconnaissance des matériaux (Détection de la nature des amiantes)
UBP	Unité de broyage primaire pour les déchets composites (fibro-ciments)
SL	Site de lavage sous pression (dégrillage et lavage) des déchets bruts hétérogènes (DBHE)
RB	Réacteur Biologique (bactéries, sidérophores : extraction du fer, nickel, chrome, magnésium...)
RTA	Réacteur chimique (attaque acide et extraction du magnésium restant)
MI	Matériaux intermédiaires (produits du traitement chimique, base de synthèse de matériaux valorisables (CSH, tobermorite, zéolithes)
PSG	Phase solide grossière (> 1 mm)
PSF	Phase solide fine
UBS	Unité de broyage secondaire

Le pilote proposé à la fin du projet Valmiant 1 sur un seul déchet, le chrysotile-gypse comprenait 3 postes essentiels, auxquels il eut fallu ajouter un dispositif de traitement des eaux de procédé. A l'issue de Valmiant 2, le pilote de traitement comporterait 2 versions : une version baser sur un traitement biochimique (biologique couplé à un traitement chimique), une version purement biologique. Le réacteur biologique (RB) jouerait alors un double rôle : (i) extraire les métaux polluants à l'aide de sidérophores, (ii) mettre en contact les fibres avec des bactéries privées de magnésium afin de détruire au moins partiellement la structure du chrysotile.

Une autre version consistant à produire les sidérophores dans un réacteur séparé est possible. A l'échelle de la tonne, que ce soit l'une ou l'autre des versions, le protocole d'exploitation doit assurer la disparition de toutes traces d'amiante (cf. méthodes de détection au §III) et l'évaluation des données suivantes :

1. taux d'extraction de fer et des métaux lourds
2. taux d'extraction du magnésium (MLD)
3. rendements de la valorisation
4. nombre de cycles possibles pour la réutilisation des eaux de procédé

Ce protocole implique des efforts conceptuels importants :

5. la définition des paramètres et des invariants conducteurs du système (circulation des déchets et des eaux, débits, chargements des matériaux et des intrants.
6. le relevé permanent des données (Température, pression, pH, compositions chimiques, données biologiques...).
7. la mise en place définissant les rendements décisifs, leurs marges de variation, leurs équilibres relatifs, les réglages.

Le tout repose sur un pilotage informatique traitant les données relevées par des capteurs, disposés à des points de contrôle dûment choisis sur le pilote.

XII – Conclusions et Perspectives

Le projet Valmiane 2 était ambitieux sur deux plans.

8. Le premier "A" était d'étendre les résultats de Valmiane 1 à toutes les catégories de déchets amiantés que ce soit par la nature de l'amiante ou par la diversité des formes et des fonctions. Ce qui implique la détection à priori de la nature des déchets traités, variétés et formes.
9. Le second "B" était de déterminer des procédures d'inhibition et de valorisation, ayant un impact faible sur l'environnement et une économie acceptable.

Devant la complexité et les difficultés réelles que posent la détection, l'inhibition de la dangerosité, la valorisation ou l'élimination des résidus des traitements, de tous les déchets amiantés, cette ambition pouvait paraître démesurée. Elle avait tout de même l'avantage de nous amener à dresser un bilan de l'état du sujet, après Valmiane. Les résultats obtenus dans Valmiane 2 sont globalement concluants.

La détection "*in situ*" de la présence d'amiante est la première démarche de salubrité publique. L'apparition d'appareils portatifs comme le Phazir est un net progrès. Mais les travaux sur la détection des modes de vibrations cristallines des différentes fibres d'amiantes par l'absorption infrarouge et la diffusion Raman, montrent que l'on peut faire mieux, tant au niveau de la sélectivité que de la sensibilité. Sous la condition de passer au stade de la conception d'un nouvel appareil dans le cadre d'une collaboration industrielle, cette phase du projet peut être considérée comme un premier succès.

Malgré le caractère trompeur des termes génériques « amiante » ces minéraux sont issus de roches mères très différentes. Les chrysotiles et toutes les fibres issues des roches amphibole amosite, crocidolite, trémolite ne se ressemblent en rien, sinon par leurs caractères fibreux et isolante. Leurs textures et les propriétés physico-chimiques qui en découlent sont opposées. La déstructuration qui signe la disparition des dangers spécifiques aux amiantes devra se faire donc selon deux filières différentes.

Le chrysotile natif, ouvré ou sous forme de flochage ou encore présent dans les fibrociments, peut être dissout à température ambiante dans une solution acide *ad hoc*, résultat positif confirmé dans Valmiane 1. Mais dans la pratique, la durée, la présence de micropolluants et l'usage de l'acide sulfurique, n'étaient pas assez satisfaisants.

Le début de Valmiane 2 a coïncidé avec la découverte faite de l'usage possible des sidérophores pour capter par chélation le fer et certains métaux de transition, souvent présents dans les amiantes comme le nickel et le chrome.

La collaboration de SOMEZ avec les biologistes de l'Université de Strasbourg a permis une avancée dans ce domaine. Toujours dans ce cadre, le projet a mis en œuvre une technique biologique d'extraction *in situ* du magnésium, obtenue en soumettant des micro-organismes telluriques tels que les *Pseudomonas* à une privation alimentaire en magnésium. Lesdites bactéries se servent alors dans la couche de brucite et ainsi détruisent progressivement la texture fibreuse du chrysotile

Dans la pratique, cela ne signifie pas nécessairement l'abandon total du traitement acide des chrysotiles. Des systèmes biochimiques peuvent se révéler plus efficaces, d'autant que le choix de l'acide, sa force et la nature de son ligand, favorisent l'extraction du magnésium, plus délicate à la sortie d'un réacteur biologique. C'est au niveau d'un pilote préindustriel que ce choix parmi ces versions va s'affiner.

Sous condition que seul le chrysotile soit présent, le plan "A" est satisfait à minima d'énergie dans des conditions thermo- dynamiques normales (20°C, 1 Atm). A ces avantages, vient s'ajouter le fait que la durée effective du traitement est ramenée de 30 jours à moins d'une semaine.

Il n'en va pas de même, pour les fibrociments dont le traitement est subordonné à un broyage préalable très coûteux en énergie compte tenu des quantités en jeu, de l'ordre de plusieurs millions de tonnes.

La complexité élevée de (FF) ne permet qu'une estimation large de l'impact sur l'environnement et seule une première approche des cycles de vie des différentes versions est possible, mais il est raisonnable d'affirmer que l'impact sera au moins dix fois plus faible.

C'est au niveau des premiers pilotes en fonctionnement que ces résultats seront appréciables. Ici ces estimations à minima sont incontestables pour la filière (FF) qui s'applique seulement aux chrysotiles purs ou sous forme de flocage, et à un degré moindre aux déchets de fibrociment. Elles reposent sur l'évolution à la fois qualitative et quantitative des intrants (acides et bases, bactéries et sidérophores), sur l'accroissement des possibilités de recyclage des eaux de procédés et sur la durée fortement réduite des traitements.

La filière qui convient aux amphiboles n'est réalisable qu'au prix d'une altération hydrothermale classique, coûteuse en énergie et logistiquement en temps et en surface. Il va de soi que "A" doit encore être amélioré. Une évaluation détaillée est nécessaire avant sa mise en œuvre généralisée. D'autre part, la valorisation des déchets solides serait limitée à des fins de charges minérales ou filler en construction, à condition de s'assurer du respect des critères environnementaux adhoc, et "B" est aussi en question.

S'agissant de l'usage du pilote aux amphiboles, une extension était espérée, au prix d'un couplage entre deux réacteurs mettant en jeu à nouveau des sidérophores. Mais devant leur inefficacité actuellement non prouvée à extraire notamment le fer de la charpente cristalline des amphiboles, il n'est plus possible de prévoir une seule filière commune pour traiter les amiantes « tout venant ». Cependant cette éventualité reste potentiellement valable. Elle mériterait de nouveaux essais mettant en jeu les techniques de visualisation des éléments constitutifs des fibres d'amphiboles.

L'installation d'une filière dédiée au traitement et à la valorisation des déchets contenant des amphiboles doit être traitée au cas par cas. Elle doit être précédée d'une étude financière afin de comparaison avec les traitements industriels actuels (fusion par torche à plasma) ou traitement faisant intervenir l'acide fluorhydrique seul ou mélangé à l'acide sulfurique.

La valorisation des résidus solides de la filière (FF) dédiée exclusivement au chrysotile pose beaucoup moins de problèmes si l'on se limite à la synthèse de CSH bien adaptés à la demande de dépollution des fluides industriels et/ou des eaux de procédés contenant des cations polyvalents. Ces matériaux étant de parfaits compléments aux zéolithes, où les alcalins sont en tête de hiérarchie d'échange.

La valorisation de la phase liquide par extraction du magnésium, dépend de la nature du traitement de déstructuration utilisé. Si l'on choisit la biologie, la récupération du magnésium, partagé entre le surnageant et les bactéries qui l'ont ingéré, compliquera nécessairement la conception des réacteurs, et accroîtra la DBO de l'eau de procédé à traiter.

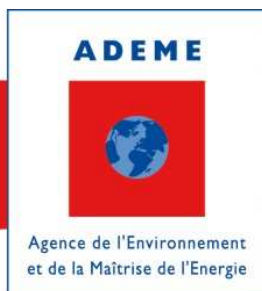
Si l'on adjoint au procédé biologique un réacteur chimique, celui-ci peut jouer un triple rôle simplificateur. D'abord faciliter l'extraction du magnésium des fluides organiques issus du ou des réacteurs biologiques, ensuite orienter ces eaux vers la mini station d'épuration et enfin il peut contribuer au recyclage de l'eau de procédé avant son renvoi en tête de procédé.

L'ensemble de ces résultats prometteurs aura sans aucun doute l'avantage de séduire des partenaires industriels qui ont déjà manifesté leur intérêt pour ces travaux.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr