



Amiante : quelles sont les alternatives à l'enfouissement et est-ce que la valorisation est possible ?

BOUGRINI Mohamed-jalal

Sous la direction de : Monsieur
Arnaud PARENTY

« Mémoire de fin d'études de la 2^{ème}
année de Master »

Année Universitaire 2016-2017,
Master 2 Ingénierie de la Santé,
Parcours Evaluation et Gestion des
Risques Environnementaux et
Professionnels

Composition membres du jury :

Monsieur DENAYER F.O.

Monsieur PARENTY A.

Faculté Ingénierie et Management de la Santé – ILIS
42 Rue Ambroise Paré
59120 LOOS

Remerciements :

En préambule de ce mémoire je souhaiterai adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide pour la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement, M. Arnaud PARENTY pour son suivi et ses conseils qui ont accompagné la rédaction de mon mémoire.

Je remercie Mme Stéphanie CATIN, M. Mikael KOCHMANN et M. Julien MAZEAU pour leur coopération, ainsi que pour les précieuses informations qu'ils m'ont fournies.

Sommaire :

I	L'AMIANTE :	4
I.1	PRÉSENTATION ET PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES :.....	4
I.2	LES PRODUITS AMIANTÉS :.....	6
I.3	PRODUCTION ET IMPACT ÉCONOMIQUE :.....	8
I.4	PROBLÈME SANITAIRE POSÉ PAR L'AMIANTE:.....	10
I.4.1	<i>Mécanisme toxicologique</i>	10
I.4.2	<i>Maladies professionnelles</i> :.....	13
I.5	RÉGLEMENTATION :.....	14
I.5.1	<i>Le repérage</i>	14
I.5.2	<i>Le désamiantage</i>	16
I.5.2.1	Exemple d'un procédé de désamiantage :.....	18
I.6	LES DÉCHETS AMIANTÉS :.....	20
I.6.1	<i>Conditionnement et stockage des déchets avant traitement</i> :.....	21
I.7	LA GESTION DES DÉCHETS AMIANTÉS PAR ENFOUISSEMENT :.....	22
II	LES MODES DE TRAITEMENT ALTERNATIFS À L'ENFOUISSEMENT :	27
II.1	LES DIFFÉRENTES OPTIONS POSSIBLES :.....	27
II.2	REVUE CRITIQUE DES TECHNIQUES DE TRAITEMENT ET DE VALORISATION DE L'AMIANTE :.....	29
II.3	LES PROCÉDÉS THERMIQUES : LA VITRIFICATION DES DÉCHETS : LA TORCHE À PLASMA (23)	(24) 29
II.3.1	<i>Procédé</i> :.....	31
II.3.2	<i>Résultat</i> :.....	32
II.3.3	<i>Avantages</i> :.....	32
II.3.4	<i>Inconvénients</i> :.....	32
II.3.5	<i>Valorisation du vitrifié</i> :.....	33
II.3.5.1	Le Cofalit :.....	33
II.4	LES PROCÉDÉS THERMOCHIMIQUES : ARI TECHNOLOGIES (29) (30) (31):.....	35
II.4.1	<i>Procédé</i>	36
II.4.1.1	Phase d'alimentation :.....	36
II.4.1.2	Phase de traitement dans le foyer rotatif :.....	36
II.4.1.3	Phase de sortie et de refroidissement :.....	37
II.4.2	<i>Valorisation</i> :.....	38
II.4.3	<i>Avantages et inconvénients</i> :.....	38
II.5	LES PROCÉDÉS THERMOCHIMIQUES : PROJET VALMIANTE (32).....	40

II.5.1	<i>Procédé</i>	40
II.5.1.1	Phase 1 : Inhibition de la dangerosité spécifique de l'amiante	40
II.5.1.2	Phase 2 : Valorisation de déchets amiantés.....	41
II.5.2	<i>Avantages</i>	41
II.5.3	<i>Inconvénients</i>	42
II.6	LES PROCÉDÉS THERMOCHIMIQUES : PROCÉDÉ SUMITOMO OSAKA CEMENT (33)...	42
II.6.1	<i>Procédé</i>	42
II.6.2	<i>Avantages et inconvénient</i>	43
II.7	LES PROCÉDÉS THERMOCHIMIQUES : PROCÉDÉ NEO ECO RECYVLING/PROCÉDÉ DE TRAITEMENT D'UN SOLIDE AMIANTE (34).....	43
II.7.1	<i>Procédé</i>	44
II.7.1.1	Phase d'inertage	44
II.7.1.2	Phase de valorisation	45
II.7.2	<i>Avantages et inconvénient</i>	45
II.7.3	<i>Procédé similaire</i> : CAPENA/LACOUT.....	45
II.8	LES PROCÉDÉS AUTRES : TRAITEMENT DES DÉCHETS AMIANTÉS PAR MICRO-ONDES (36) 46	
II.8.1	<i>Expérience</i>	46
II.8.2	<i>Application sur le terrain</i>	46
II.8.3	<i>Avantages</i>	47
II.8.4	<i>Le procédé ATON-HT (37)</i>	48
III	DISCUSSION	49
III.1	POINT DE VUE TECHNIQUE ET MATURITÉ	49
III.2	PRODUITS DE VALORISATION	51
III.3	CADRE RÉGLEMENTAIRE ET RESPONSABILITÉ DES DÉCHETS	52
III.4	POINT DE VUE ÉCONOMIQUE ET PERSECTIVES	53

CONCLUSION

Liste des figures :

Figure 1 : Amiante, de la recherche scientifique à l'interdiction.....	1
Figure 2 : exemples de présence d'amiante dans un bâtiment (source : CARSAT)....	7
Figure 3 : Illustrations de présence d'amiante.....	7
Figure 4 : Répartition de la production mondiale d'amiante [10].....	8
Figure 5 : carte des pays ayant banni ou mis en place une politique de restriction de l'amiante [10].....	9
Figure 6 : Rapport de taille entre un cheveu humain et des fibres d'amiante.....	10
Figure 7 : Vue générale de l'appareil respiratoire de l'homme.....	11
Figure 8 : progression du nombre de maladies professionnelles liées à l'amiante [3]	14
Figure 9 : Equipement nécessaire à une opération de désamiantage.....	18
Figure 10: photo d'un centre d'enfouissement.....	24
Figure 11 : photo d'enfouissement intégrale d'équipement contenant de l'amiante...	25
Figure 12 : Schéma du procédé INERTAM.....	30
Figure 13 : schéma du procédé ARI TECHNOLOGIE.....	38
Figure 14 : Schéma de principe du procédé ATON HT.....	48
Figure 15 : échelle TRL des technologies présentées.....	50

Liste des tableaux :

Tableau 1: les différentes variétés et espèces d'amiante.....	4
Tableau 2 : Répartition des centres d'enfouissement en France.....	23
Tableau 3 : Réaction pour des déchets homogènes.....	40
Tableau 4 : Bilan des technologies présentés [39].....	49

Glossaire et définitions :

- INVS : institut de veille sanitaire
- EPI : équipement de protection individuelle
- MCA : matériaux contenant de l'amiante
- DTA : dossier technique amiante
- IARC : international agency for research on cancer (centre international de recherche sur le cancer)
- HEPA : High Efficiency Particulate Air (filtre à particules aériennes à haute efficacité)

Introduction :

L'amiante, ce minéral fibreux dont l'utilisation remonte à l'Égypte pharaonienne est derrière l'un des plus importants scandales sanitaires du siècle dernier et dont les répercussions se prolongent aux générations actuelles et sans aucun doute aux générations à venir. Les prémices de l'impact sanitaire d'une exposition à l'amiante apparaissent en 1898 (1). C'est la première fois que des effets négatifs liés à la manipulation ou l'exposition à l'amiante sont décrits. À partir de là, la recherche s'intensifie, les effets sont prouvés et ce n'est qu'un siècle plus tard qu'un consensus voit le jour sur la dangerosité de l'amiante et que les interdictions d'utilisation sont décrétées par de nombreux pays. En France, le décret d'interdiction de l'amiante est publié en 1997 (2).

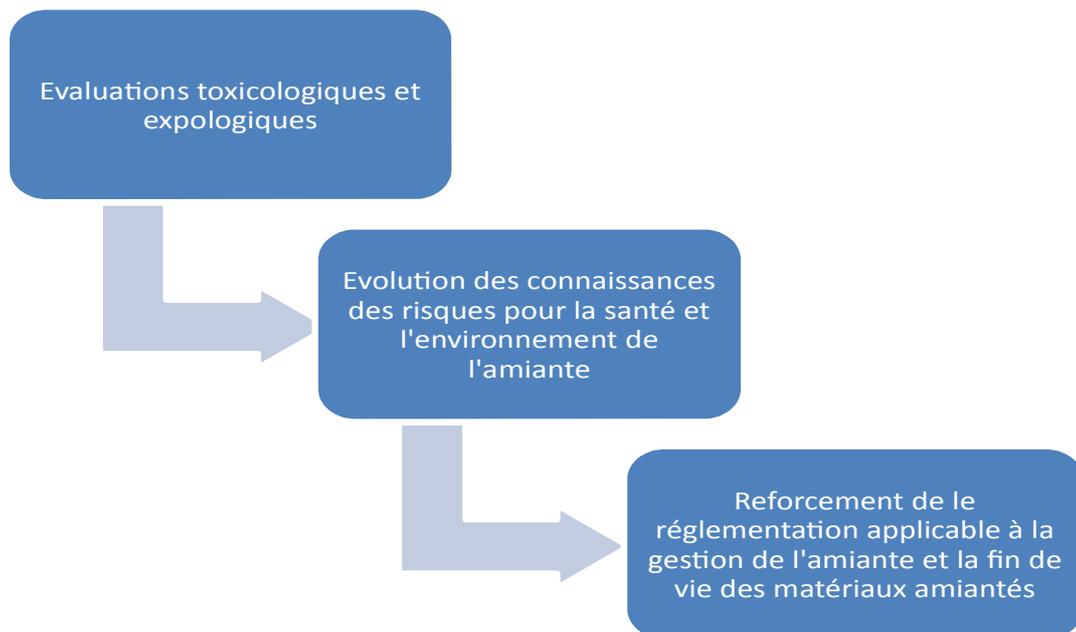


Figure 1 : Amiante, de la recherche scientifique à l'interdiction

En dépit de cette interdiction, l'amiante demeure aujourd'hui la première cause de maladie professionnelle en termes de coût et la deuxième cause de mortalité au travail (3). Un rapport publié par la caisse de sécurité sociale estime à 22 milliards d'euros le coût sanitaire de l'amiante d'ici 2022 (4). Dès lors, une question s'impose : Comment en sommes-nous arrivés là ? Force est de constater que les ingrédients de cette crise sanitaire n'ont rien d'exceptionnels. Tout d'abord, figurent l'abondance de ce minerai, la facilité de son exploitation ainsi que son faible coût. En second lieu,

sont appelés à la barre les propriétés physiques et chimiques spécifiques à l'amiante : l'amiante ne brûle pas, résiste aux agressions chimiques, et possède une résistance mécanique élevée (5). Ces 2 propriétés, mises côte à côte, ont participé à l'accroissement de la production et ont favorisé l'utilisation de l'amiante dans de multiples secteurs, et plus particulièrement dans celui du BTP où de nombreux bâtiments et autres constructions accueillant du public ont été floqués à l'amiante. Les effets sur la santé n'étant prouvés que tardivement, l'exposition à l'amiante est devenue possible au travail, au domicile et plus généralement dans l'environnement.

Si le législateur avait pour point de départ l'interdiction de l'amiante, sa réglementation a évolué pour intégrer le retrait de ce matériau. Cette opération appelée désamiantage doit respecter un cadre précis défini par la loi et conduit à la génération de déchets amiantés. Se pose alors la question de ces déchets, car si l'amiante était initialement une problématique sanitaire, elle devient avec le désamiantage une problématique plus globale. Le fait est que sous la forme « déchet », l'amiante conserve ses propriétés toxiques et par conséquent, ne peut être géré comme un déchet banal. Alors que faire de ce déchet ? Comment l'éliminer et par la même occasion éliminer ou réduire ses risques ? et enfin est-il possible de valoriser ce déchet ?

L'ensemble de ces questions ont en commun la même problématique qui est celle de la gestion des déchets amiantés et c'est en ce sens que la rédaction de ce mémoire a été entreprise. Au vu de la quantité importante d'amiante déployée, le marché a vu fleurir de nombreux travaux de désamiantage générant de plus en plus de déchets et incitant par la même occasion la recherche dans le domaine (6). Si l'enfouissement a été la principale destination des déchets amiantés, cette solution n'est désormais plus suffisante. Dans ce contexte, de nouvelles perspectives ont été étudiées et la recherche s'est orientée vers des techniques de valorisation. Cela nous mène vers la problématique de ce mémoire à savoir :

Amiante, quelles sont les alternatives à l'enfouissement et est-ce que la valorisation est possible ?

Pour répondre à cette question, ce mémoire est composé de trois parties principales :

La première explique les causes de l'utilisation massive de l'amiante et l'impact sanitaire que cela a entraîné. Elle permettra de mettre en évidence les spécificités de ce minéral, de mesurer sa production à travers le monde et de décrire sa toxicité. Le but étant de mieux concevoir les difficultés qui se posent lors de la génération de déchets amiantés et aussi d'expliquer en quoi les déchets amiantés sont différents. L'aspect réglementaire et le désamiantage comme procédé générant des déchets amiantés sont aussi abordés.

La seconde partie concerne la gestion des déchets amiantés et leurs principales voies de traitements. Elle présentera les techniques de gestion des déchets amiantés et celles permettant de les valoriser. L'objectif étant de faire un état de l'art sur les nouvelles techniques de valorisation, de décrire leurs limites et surtout de voir si elles représentent une alternative valable à l'enfouissement.

Enfin, se mémoire se conclura sur une discussion dans laquelle est abordée la maturité technologique des différents procédés, les produits de valorisation, le cadre réglementaire puis les perspectives.

I L'amiante :

I.1 Présentation et propriétés physico-chimiques :

Le terme amiante vient du grec *amiantos* qui signifie incorruptible. Ce terme, résume les propriétés dites exceptionnelles de ce matériau : isolant, ignifuge résistant à la friction et aux produits chimiques. Les entreprises le commercialisant avaient pour slogan : « asbestos is designed to last a lifetime — a trouble free lifetime » (7) (l'amiante, conçu pour durer toute une vie – une vie sans problème).

L'amiante enveloppe une large variété de silicates formée naturellement au cours des métamorphismes des roches et transformées en fibres par un processus mécanique. On distingue à travers un classement minéralogique deux variétés d'amiante : la serpentine et les amphiboles (5).

La chrysotile (minéral de la roche serpentine) ou amiante blanc, dispose d'une structure cristalline en couche formant des fibrilles dont le diamètre est compris entre 0,02 et 0,03 μm . Ces fibrilles sont solidement agglomérées et forment une surface spécifique élevée, propice aux phénomènes d'absorption et aux phénomènes d'isolation.

Quant aux amphiboles, elles comprennent cinq espèces distinctes : anthophyllite, amosite (amiante bleu), crocidolite (amiante brun), actinolite et trémolite. Chacune diffère de l'autre par sa composition chimique. Les amphiboles ne disposent pas de fibrille unique (contrairement au chrysotile), leurs fibres sont droites, leur diamètre est dix fois plus grand que celui des chrysotiles avec des variabilités entre les cinq espèces.

Tableau 1: les différentes variétés et espèces d'amiante

Espèces	N° cas	Variété	Longueur des fibres	Diamètre des fibrilles	Composition chimique
Chrysotile (amiante blanc)	12007-29-5	Serpentine	40mm	0,02 μm	3MgD.28iD2.2H2D
Anthophyllite	17068-78-9	Amphiboles			7MgD.88iD2.H2D
Amosite	12172-	Amphibole	70 mm	0,1 μm	11 FeD.3MgD.168iD2.2H2D

(amiante bleu)	73-5	s			
Crocidolite	12001-28-4	Amphiboles	70mm	0,08 µm	Na ₂ D.Fe ₂ D ₃ .3FeD.88iD ₂ .H ₂ D
Actinolite	13768-00-8	Amphiboles			2CaD.4MgD.FeD.88iD ₂ .H ₂ D
Trémolite	14567-73-8	Amphiboles			2CaD.5MgD.88iD ₂ .H ₂ D

Les propriétés physico-chimiques de l'amiante ont joué un rôle important dans le développement de l'utilisation des fibres d'amiante sous de multiples formes. Ces propriétés sont décrites ci-dessous (8):

- Propriétés de surface : les fibres de chrysotile disposent d'une charge de surface positive et par conséquent d'un taux de sédimentation faible. De ce fait, elles ont été mélangées avec des amphiboles (charge de surface négative) pour la fabrication de certains matériaux tels que l'amiante-ciment. Les propriétés de surface, sont importantes à considérer pour l'ensemble des procédés industriels menant à la fabrication de produits contenant des fibres.
- L'ensemble des fibres d'amiante résiste aux bases fortes. Le chrysotile est sensible aux acides à l'inverse des amphiboles qui présentent une sensibilité variable selon les espèces (crocidolite plus résistante que l'amosite).
- Résistance mécanique : la résistance à la traction varie en fonction des espèces d'amphiboles, le chrysotile disposant d'une résistance intermédiaire. Le classement suivant est admis : crocidolite > chrysotile > anthophyllite > trémolite > actinolite.
- Résistance thermique : en dépit de leur considérable résistance thermique, l'ensemble des formes d'amiante commencent toutes à se décomposer au-dessous de 1000°C.
- Faible conductivité électrique.

I.2 Les produits amiantés :

Comme évoqué précédemment, les qualités dites exceptionnelles de l'amiante associées à son faible coût ont favorisé son utilisation massive. En ce sens, de nombreux produits contenant ce minerai ont été mis à disposition des industriels et des particuliers. Ces différents produits peuvent être classés en fonction de leur présentation (9) :

- L'amiante brut en vrac, utilisé pour l'isolation thermique en bourrage ou en flochage (projection)
- L'amiante tissé ou tressé, utilisé pour l'isolation thermique de canalisations, d'équipements de protection individuelle (EPI), de câbles électriques...
- L'amiante sous forme de plaques de papier ou carton d'épaisseur variable (5 à 50 mm), utilisé pour l'isolation thermique d'équipements chauffants, de faux-plafonds, de joints...
- L'amiante sous forme de feutre, utilisé surtout pour la filtration
- L'amiante incorporé sous forme de poudre présente dans des mortiers à base de plâtre, dans des mortiers colles, des colles et des enduits de finition
- L'amiante mélangé à du ciment (amiante-ciment), utilisé pour la fabrication de multiples composés pour la construction : plaques ondulées, éléments de façade, gaines de ventilations, canalisations...
- L'amiante comme charge minérale, incorporé à des peintures, des vernis, des mastics, des mousses d'isolations...
- L'amiante mélangé à des matières plastiques ou à des élastomères permettait de fabriquer des joints, des revêtements, des ustensiles ménagers, des garnitures de freins...
- L'amiante incorporé aux bitumes servait pour l'étanchéité des toitures, contre la corrosion, pour les revêtements routiers...

Suite à l'interdiction totale de l'amiante en 1997, aucun de ces produits n'est encore fabriqué ni importé en France. Néanmoins, ce minéral demeure présent au sein des bâtiments ou moyens construits avant cette date.



Figure 2 : exemples de présence d'amiante dans un bâtiment (source : CARSAT)



Figure 3 : Illustrations de présence d'amiante

- A : Tresses blanches au liseré rouge contenant de l'amiante chrysotile
- B : toiture amiantée (fibrociment)
- C : revêtement goudronné d'une chaussée contenant de l'amiante
- D : dalles de sol amiantées

I.3 Production et impact économique :

L'exploitation de l'amiante a augmenté tout au long du 20^{ème} siècle jusqu'à atteindre un pic en 1977 avec une production estimée à 4,8 million de tonnes. Cette production s'est organisée autour de deux pôles principaux à savoir le Canada et l'Union soviétique qui représentaient à l'époque plus des deux tiers de la production mondiale (10).

Puis à la fin des années 70, les risques liés à l'inhalation de fibres d'amiante sont reconnus au niveau international et ont conduit à la mise en place de mesures visant la protection des salariés exposés et à une réduction croissante des quantités produites.

Production mondiale d'amiante en 2015

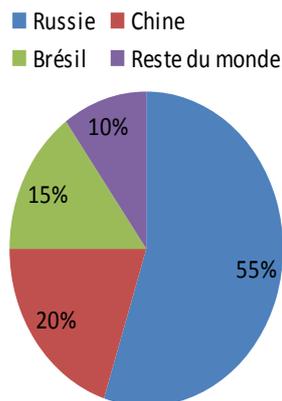


Figure 4 : Répartition de la production mondiale d'amiante [10]

Selon une étude récente la quantité d'amiante extraite en 2015 dépassent les 2 millions de tonne. La Russie (55%) et la Chine (20%) représente les deux principaux producteurs avec respectivement un total de 1,1 million de tonnes et 400.000 tonnes en 2015. Pourtant cette production avait connu une tendance à la baisse entre 2011 et 2013 avec une production passant sous les 2 millions de tonnes annuelles (11).

Notons que l'interdiction de la production d'amiante dans de nombreux pays exportateurs (dont de grands producteurs tels que le Canada, les USA¹) a eu un impact économique. Au sein de ces pays, les mines d'amiante ont dû être fermées pour mettre fin à l'exposition des travailleurs, entraînant par la même occasion des pertes d'emplois. Aussi, une nouvelle problématique apparaît. Il s'agit de la prise en charge (ou dédommagements) de ces travailleurs et des victimes de l'exposition à l'amiante. Le coût global de cette prise en charge est tellement important qu'il porte atteinte à la santé financière des systèmes de réparation des maladies professionnelles et conduit à l'insolvabilité des entreprises présentes sur le marché de l'amiante (12). Aux USA, les demandes d'indemnisation ont dépassé 70 milliards de dollars (13). En France, plus d'un milliard d'euros est consacré chaque année aux personnes ayant été exposées à l'amiante (ce chiffre ne prend en compte que les victimes des mésothéliomes) (4).

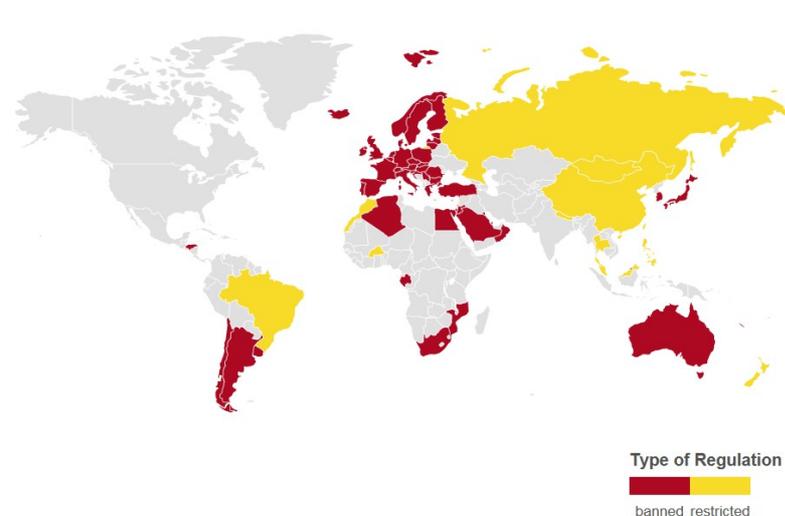


Figure 5 : carte des pays ayant banni ou mis en place une politique de restriction de l'amiante [10]

Néanmoins, la sortie du marché de l'amiante a ouvert la porte à l'expansion d'une nouvelle activité à savoir le désamiantage. En effet, au vu de l'importante quantité d'amiante déployée au cours du 20^{ème} siècle, les pays qui se sont impliqués dans des politiques d'interdiction de l'amiante puis dans des stratégies de retrait connaissent de nombreux travaux de désamiantage. Ces travaux génèrent des déchets amiantés

¹ Aux Etats Unis les mines n'ont pas été fermées du fait d'une interdiction. De nombreuses procédures judiciaires menées à l'encontre des producteurs d'amiante avec de fortes indemnités aux victimes ont forcé les industriels à réduire voire arrêter leur production

et respectent un protocole précis car les opérateurs les conduisant sont en contact avec l'amiante.

Une fois générés, ces déchets sont principalement acheminés vers des sites d'enfouissement. Cependant, cette solution n'est plus viable sur le moyen et le long terme car la capacité des sites d'enfouissement est restreinte et les citoyens n'acceptent plus l'installation de nouveaux sites. Aussi, l'enfouissement ne permet pas d'éliminer l'amiante ou de mettre fin à sa toxicité, il permet uniquement de masquer voire reporter le problème.

I.4 Problème sanitaire posé par l'amiante:

L'organisation mondiale de la santé déclare que chaque année plus de 107.000 personnes meurent de maladies respiratoires (cancer du poumon, mésothéliome...) issues d'une exposition professionnelle (14). Il faut noter que la latence de ces cancers est de 20 à 30 ans avec une médiane de 22,8 ans. Aujourd'hui encore, du fait de l'intervalle de temps très long pour qu'un cancer associé à une exposition à l'amiante se déclare, l'exposition à l'amiante reste, de loin, la plus importante cause des cancers professionnels. En 1987, l'amiante est considéré comme cancérigène de groupe 1 par l'IARC (15).

Au vu de l'importance de ces effets et afin d'empêcher de nouvelles expositions, de nombreux pays ont instauré des interdictions d'utilisation ainsi qu'un bannissement de l'amiante et des produits en contenant. Demeure d'une part la problématique de désamiantage pour laquelle des procédures bien spécifique sont mises en place afin d'éviter tout risque d'exposition et d'autre part le devenir des déchets amiantés.

I.4.1 Mécanisme toxicologique

L'amiante dispose d'une structure fibreuse constituée de multiples fibrilles qui se détachent sous l'effet de frottement ou de choc pour former des poussières fines invisibles à l'œil nu (3). La dimension et la nature fibreuse de ces

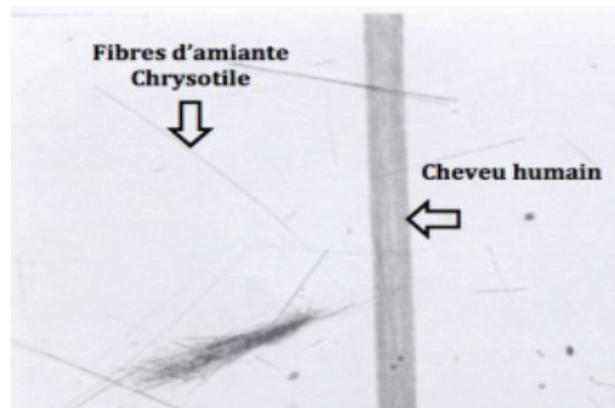


Figure 6 : Rapport de taille entre un cheveu humain et des fibres d'amiante

poussières jouent un rôle déterminant sur les effets que peuvent engendrer une exposition à l'amiante. Ainsi :

- Plus les particules sont de petite taille plus elles pénètrent profondément l'appareil respiratoire. Les fibres dont le diamètre est inférieur à $3\mu\text{m}$ peuvent se déposer dans le poumon profond (zone alvéolaire) avec le risque de migrer vers la plèvre. Celles supérieures à $3\mu\text{m}$ se déposent dans le tractus respiratoire (au niveau des bronches et bronchioles).
- Plus les fibres sont longues et fines, plus elles sont difficilement éliminables et par conséquent plus dangereuse.

Les poussières d'amiante présentes dans l'atmosphère vont être absorbées par inhalation et se déposer dans les voies respiratoires. Tout de même, des mécanismes de défense sont présents pour éliminer les fibres inhalées (16) :

- Le transport muco-ciliaire rejette vers l'extérieur les particules inhalées, par l'intermédiaire de nombreux petits cils qui remontent ces particules tel un escalator. Ce mécanisme permet d'arrêter au niveau du pharynx 90% des particules ayant une taille supérieure à 10 microns.
- Les macrophages : système de défense dirigé contre les fibres capables d'atteindre les bronchioles terminales et les alvéoles.

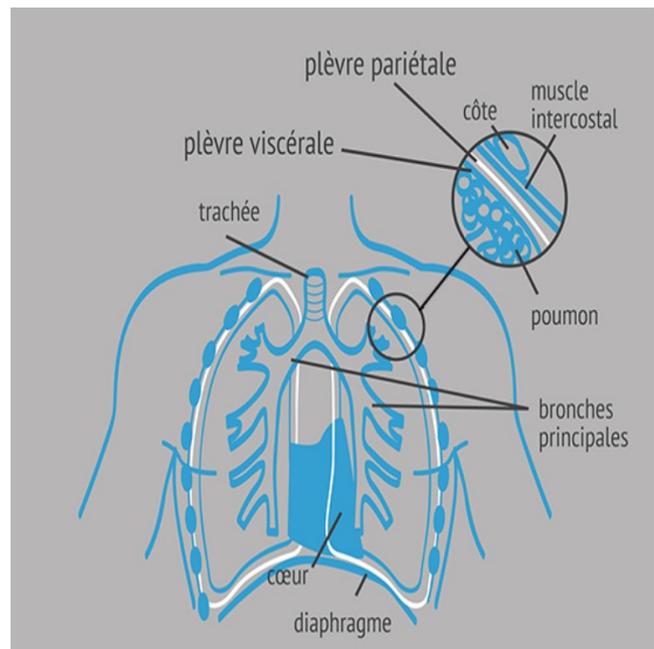


Figure 7 : Vue générale de l'appareil respiratoire de l'homme

Cependant, lorsque l'exposition est importante ou du fait de mécanismes de défense déficients, cette double protection naturelle contre les fibres d'amiante n'est plus efficace. Dans ce cas, les fibres d'amiante sont retenues dans les poumons et vont provoquer une inflammation du poumon et/ou de la plèvre. Ces manifestations sont dites : très progressives et ce n'est qu'après plusieurs années qu'une fibrose du poumon profond (asbestose) peut se manifester. Cela explique en partie, que malgré

l'interdiction de l'utilisation de l'amiante il y a presque 20 ans, de nouveaux cas d'asbestose sont recensés. Notons que les fibres d'amiante peuvent aussi altérer les cellules épithéliales des bronches provoquant des perturbations de division cellulaire (fragmentation chromosomique et cassures de l'ADN) capables d'induire un cancer broncho-pulmonaire.

Certaines fibres vont être capables de migrer vers l'extérieur de la cavité pleurale et atteindre la plèvre pariétale. Cela entrainera le développement de plaques pleurales qui sont des zones de fibrose localisée, le plus souvent asymptomatique, mais qui peuvent avoir un impact sur la fonction respiratoire. Ces plaques sont aussi considérées comme un marqueur de l'exposition. Toujours au niveau de la plèvre, l'inhalation de fibres d'amiante peut provoquer un mésothéliome (cancer de la plèvre). Il s'agit d'une lésion rare mais au pronostic sévère caractérisé par une longue phase de latence (17).

Atteinte pleurale bénigne (INRS):

Différentes lésions pleurales sont capables de coexister ou de se succéder :

- Pleurésie bénigne : épanchement de liquide
- Fibrose pleurale diffuse : sclérose consécutive à une pleurésie
- Plaque pleurale pouvant se calcifier au fil du temps
- Atélectasie par enroulement : masse bénigne se développant au contact d'un épaissement de la plèvre.

Asbestose :

Lorsque l'empoussièrement est important, l'amiante peut induire une sclérose du tissu pulmonaire. Le risque d'asbestose et sa gravité dépendent du niveau et de la durée d'exposition. De plus les fibres d'amiante vont provoquer des lésions mécaniques sur la paroi des alvéoles pulmonaires ce qui aura un impact sur l'épithélium alvéolaire et entrainera un stress oxydant par la génération de radicaux libres. Il en résulte une infiltration fibreuse qui réduit la surface d'échanges gazeux au niveau des alvéoles et se traduit par une gêne respiratoire et un retentissement sur le fonctionnement du cœur.

Cancers :

La plupart des cancers liés à l'amiante concernent le tissu pulmonaire, les bronches (cancers broncho-pulmonaires) ou la plèvre (mésothéliome pleural). L'exposition à l'amiante peut aussi être un facteur de risque du cancer broncho-pulmonaire.

Mésothéliome :

Le mésothéliome pleural est quasi-spécifique d'une exposition antérieure à l'amiante. Cette dernière peut survenir des dizaines d'années précédant le diagnostic et avoir été de faible niveau. L'issue de ce cancer est généralement fatale en quelques mois car aucun traitement n'a encore fait preuve d'efficacité. Les essais thérapeutiques se poursuivent. Le mésothéliome est pris en charge comme étant une maladie professionnelle à déclaration obligatoire.

Deux notions sont aussi à considérer (hormis dimension et taille des fibres) pour expliquer les effets pathogènes de l'amiante :

- La notion de doses de fibres retenues par les poumons ou degré d'empoussièrément
- La nature chimique des fibres inhalées (solubilité des fibres), les amphiboles étant la variété de fibres la plus dangereuse.

I.4.2 Maladies professionnelles :

L'amiante est la deuxième (1^{ère} en terme de coût) cause de maladie professionnelle. Les principales pathologies liées à une exposition à l'amiante sont le cancer broncho-pulmonaire et le mésothéliome (cancer de la plèvre). Du fait du long délai qui sépare l'exposition à l'amiante et l'apparition de ces pathologies, le nombre de décès imputable à l'amiante est en nette augmentation mais tendrait à atteindre un palier. D'un autre côté le nombre de déclaration de pathologie bénignes de la plèvre décroît ce qui s'explique par la mise en place d'une réglementation interdisant l'amiante. Enfin, le nombre de cas d'asbestose est relativement constant depuis 2000. Notons tout de même qu'une étude de l'institut national de veille sanitaire (INVS) a révélé 2200 cas de nouveaux cancers et 1700 décès attribuables à une exposition à l'amiante en 2015. Cette étude a aussi estimé entre 68.000 et 100.000 décès d'ici 2050 aussi attribuables à une exposition à l'amiante (18).

Si l'utilisation et la manipulation de l'amiante est interdite en France depuis 1997, l'exposition à l'amiante demeurent possible dans certaines activités encadrées par le code du travail (INRS). Deux types d'activité sont distingués : les activités de confinement et de retrait de matériaux contenant de l'amiante, appelés activités de sous-section 3 et les activités comportant des interventions sur des matériaux ou appareils susceptibles de libérer des fibres d'amiante, appelés activités de sous-section 4.

I.5

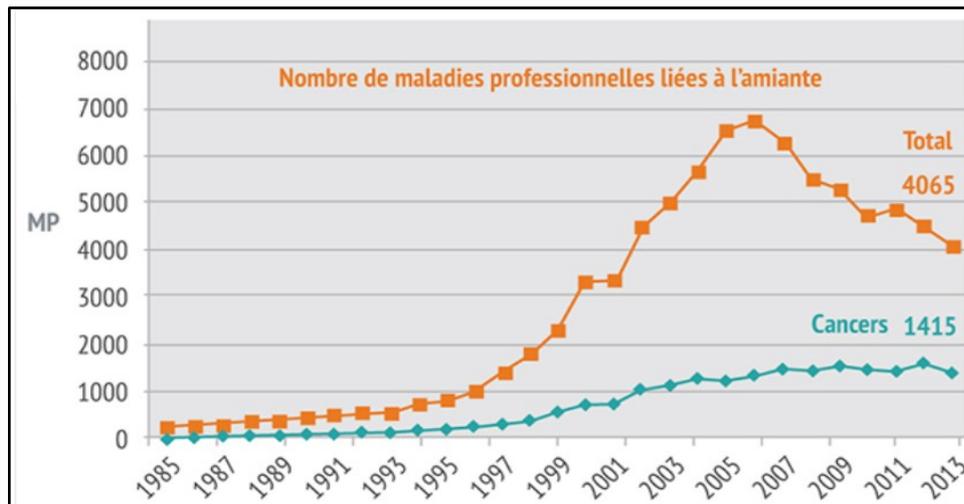


Figure 8 : progression du nombre de maladies professionnelles liées à l'amiante [3]

Réglementation :

La réglementation encadrant l'amiante se base un travail initial de repérage de ce matériau. Ce dernier étant interdit depuis 1997, il s'agit de rechercher sa présence au sein des bâtiments, installations et équipements construits et fabriqués avant cette date. Une fois l'amiante repéré, il faudra vérifier son état de conservation puis dans un troisième temps le retirer.

I.5.1 Le repérage

Le repérage de l'amiante dans les bâtiments est une obligation issue du code de la santé publique et du code du travail. Les articles L. 1334-12-1 et R. 1334-14 du code de la santé publique posent une obligation générale en matière de surveillance du risque amiante pour tous les immeubles bâtis, publics et privés, dont le permis de construire a été délivré avant le 1^{er} juillet 1997. Les propriétaires, ou à défaut les exploitants de ces immeubles, doivent y faire rechercher la présence d'amiante (repérage) et, le cas échéant, établir un diagnostic de son état de conservation dans

les matériaux et produits repérés et enfin si besoin, mettre en œuvre les mesures nécessaires pour contrôler et réduire l'exposition (9).

Ce travail de repérage aboutit à la rédaction d'**un document de repérage** (décret du 3 juin 2011) par un opérateur certifié et porté à la connaissance des parties intéressées (habitant, conducteur de travaux etc.). Ce repérage regroupe 3 listes de matériaux :

- Liste A : flocage ; calorifugeage ; faux plafonds
- Liste B : parois verticales intérieures ; planchers et plafonds ; conduits ; canalisations et équipements intérieurs ; éléments extérieurs
- Liste C : toiture et étanchéité ; façades-parois verticales intérieures et enduits ; plafonds et faux plafonds ; revêtement de sol et de murs ; conduits, canalisations et équipements ; ascenseurs et monte-charge ; équipement divers ; installations industrielles ; coffrages perdus

La recherche exhaustive de matériaux contenant de l'amiante doit être réalisée au préalable de toutes opérations (travaux, retrait...). Le but étant de connaître son état de conservation et par conséquent de mettre en place une sécurisation adaptée.

Il faut garder en tête que les matériaux et produits contenant de l'amiante sont capables de libérer des fibres :

- Lors de leur altération naturelle au cours du temps
- A l'occasion de travaux de retrait (réhabilitation, démolition etc.)
- A l'occasion d'interventions sur ces matériaux ou produits (ex : perçage ; friction ; découpe etc.).

De ce fait, les opérations de désamiantage sont réalisées avec de grandes précautions afin d'empêcher la libération de fibres dans l'environnement et/ou de capter les fibres libérées à travers des aspirateurs spécifiques, le tout sous quarantaine.

- Document de repérage : le dossier technique amiante ou DTA

Le DTA concerne des immeubles bâtis : les immeubles collectifs d'habitation, les bâtiments d'entreprises industrielles, agricoles, commerciaux, etc. Il est conservé par le propriétaire et tenu à disposition des occupants, des employeurs, des représentants du personnel Médecine du Travail, Agence Régionale de Santé,

inspection du travail, CARSAT, OPPBTP). De plus, ce document doit être fourni à toute personne physique ou morale appelée à organiser ou effectuer des travaux (avec attestation écrite de sa communication à conserver) (9).

Il est constitué par un opérateur certifié, mandaté par le propriétaire et comprend :

- Les rapports de repérage des matériaux des listes A et B ;
- Les évaluations périodiques de l'état de conservation des matériaux des listes A et B ;
- Les résultats des mesures d'empoussièrement si préconisées ;
- Les recommandations générales de sécurité notamment les procédures d'intervention;
- Les mesures conservatoires et éventuellement les travaux de retrait ou confinement à réaliser ;
- Les procédures de gestion des déchets ;
- Une fiche récapitulative.

L'état de conservation des matériaux de la liste A doit être réévalué tous les 3 ans.

I.5.2 Le désamiantage

Le désamiantage regroupe un ensemble d'opérations ayant pour but de retirer l'amiante d'un bâtiment ou d'une installation. Ces opérations sont soumises à une réglementation stricte afin de protéger la santé des travailleurs et d'empêcher la dispersion des fibres d'amiante dans l'environnement. Les opérations de désamiantage ne peuvent être réalisées qu'après un travail préalable de repérage des matériaux amiantés.

Durant ces travaux il est nécessaires de définir les mesures à prendre afin de :

- Réduire au plus bas possible, l'émission et la dispersion de fibres d'amiante pendant les travaux
- Eviter toute diffusion de fibres d'amiante hors des zones de travaux
- Garantir l'absence de pollution résiduelle après travaux

S'il était initialement nécessaire de déterminer le caractère friable (ou non friable) de l'amiante avant travaux, le décret du 29 juin 2015 relatif aux risques d'exposition à l'amiante a abrogé cette distinction. Il convient de ce fait d'appliquer les mêmes consignes de sécurité (décontamination et évacuation des équipements, mise hors tension des circuits et équipements électriques ; confinement du chantier ; protection

collective ; protection individuelle ; contrôle au cours du chantier) quel que soit l'état de l'amiante (9).

- **Niveau d'empoussièrement :**

La préservation de la santé des travailleurs est une obligation réglementaire inscrite dans le code du travail. Naturellement, cette obligation concerne aussi les travailleurs réalisant des travaux de retrait ou d'encapsulage de matériaux amiantés. Cette obligation est mentionnée dans le décret n° 2015-789 du 29 juin 2015 relatif aux risques d'exposition à l'amiante.

A : SAS de décontamination
B : Appareil de mesure du niveau de fibre dans l'air

Avant d'entamer toutes opérations de retrait ou d'encapsulage une évaluation de risques permettant d'évaluer le niveau d'empoussièrement doit être réalisée afin de s'assurer du respect de la valeur limite d'exposition. 3 niveaux d'empoussièrement sont définis par le décret sus-cité :

- Premier niveau : empoussièrement dont la valeur est inférieure à 100 fibres par litre ;
- Deuxième niveau : empoussièrement dont la valeur est supérieure ou égale à 100 fibres par litre et inférieure à 6000 fibres par litre ;
- Troisième niveau : empoussièrement dont la valeur est supérieure ou égale à 6000 fibres par litre et inférieure à 25000 fibres par litre ;

Selon le niveau d'empoussièrement, l'employeur doit mettre à disposition de ses salariés des équipements de protections individuelle adaptés aux opérations à réaliser et permettant d'assurer le respect de la valeur limite d'exposition professionnelle.

Aussi, le suivi des concentrations est assuré par des appareils de mesures déposés dans la zone de désamiantage.

- **Retrait :**

A



Figure 6 : Equipement nécessaire à une opération de désamiantage

- **Encapsulage :**

L'encapsulage maintient les matériaux contenant de l'amiante à leur place (contrairement au retrait). Il existe différentes techniques d'encapsulage choisies en fonction du niveau de la friabilité et de l'état de dégradation du MCA :

- Fixation par revêtement : mise en œuvre d'un liant ou d'un enduit étanche en couche mince avec ou sans renforcement par une toile
- L'encoffrement : mise en œuvre d'un enduit épais sur un support fixe maintenu au contact du MCA par un moyen mécanique
- Le doublage : paroi sans contact avec le MCA
- L'imprégnation : pulvérisation ou injection d'un produit liquide dont la fluidité permet de pénétrer dans l'épaisseur des MCA par capillarité et fixer les fibres en constituant un liant par polymérisation directe.

I.5.2.1 Exemple d'un procédé de désamiantage :

Si l'on prend l'exemple du désamiantage d'une voiture, les déchets amiantés concernent la peinture intérieure : 150 kg de peinture sèche contenant 10 à 15% d'amiante soit 22kg. Le désamiantage est réalisé par décapage ce qui nécessite 2,5 tonnes de sable. Ce dernier ne peut pas être réutilisé et le process génère 3 tonnes

de déchets / voiture. Ces trois tonnes sont par la suite enfouies en installation de stockage de déchets dangereux pour un coût d'environ 300 euros/ tonne.

Le coût d'une opération de désamiantage telle que celle-ci est de 30 à 35.000 euros HT. Celui de la gestion du déchet est de 900 euros/voiture ce qui reste relativement faible au regard du coût global de l'opération de désamiantage. De ce fait, la recherche est principalement axée sur la réduction du coût du désamiantage au travers de technologies alternatives et non sur la gestion des déchets qui en sont issues (19).

I.6 Les déchets amiantés :

Les déchets amiantés sont de deux types : ceux issus du désamiantage de matériaux ou d'équipements amiantés (four, joint etc.) et ceux issus de la destruction de bâtiments. Ces déchets nécessitent une prise en charge particulière aux vues des enjeux de santé publique qu'ils impliquent. Notons que si la solution d'enfouissement des déchets amiantés est la plus utilisée, elle ne fait qu'empiler les déchets et transférer la responsabilité de leur élimination aux générations à venir.

Une étude réalisée dans la région Asie pacifique a estimé la quantité de déchets amiantés générés durant les 10 prochaines années (20):

Si l'on suppose que la totalité de l'amiante consommée était convertie en matériaux de construction (avec un taux de 20% d'amiante présent dans le ciment), une durée de vie de 15 ans (informations fournies par les producteurs d'amiante ciment); la quantité de déchets amiantés issus des bâtiments serait de 48,8 millions tonne sur les 10 prochaines années. Notons que si le taux d'amiante contenu dans les matériaux était inférieur à 20%, la quantité de déchets générés serait encore plus importante. La méthode de calcul étant la suivante:

$$Q_n = C_{n-15}/k$$

Avec :

- Q_n : quantité de déchets amiantés par an
- C_{n-15} : consommation d'amiante pour l'année n-15
- k : taux d'amiante présent dans les matériaux contenant de l'amiante

D'autres solutions permettant de traiter voir d'inertiser ce type de déchets sont possibles mais ne sont pas privilégiées face à l'enfouissement. Cependant, ces nouvelles filières de traitement de l'amiante sont d'une part nécessaires au vu du volume de déchets amiantés encore présent dans notre environnement et d'autre part au vu du fait que le stockage de ces déchets en centre d'enfouissement ne met pas fin à leur toxicité. Cela va à l'encontre des principes généraux de gestion des risques dont le principe initial est d'éliminer le risque ce qui n'est pas le cas lors du stockage des déchets amiantés.

Certains pays tels que le Japon, ont pris les devants pour promouvoir les solutions d'inertage de l'amiante en développant un système de certification

garantissant la fiabilité et la qualité des procédés de destruction des déchets amiantés (21). Cela a permis d'encourager la recherche dans le domaine et a fait qu'aujourd'hui le Japon est le premier producteur de brevets pour des technologies permettant le traitement des déchets amiantés (19).

I.6.1 Conditionnement et stockage des déchets avant traitement:

Avant d'entamer le traitement des déchets amiantés, ces derniers doivent être préparés. En effet, les déchets amiantés ont la particularité d'être extrêmement friables et volatiles ce qui leur confèrent un fort potentiel de pollution. De ce fait, ces déchets doivent être conditionnés immédiatement après leur dépose afin de limiter le risque de pollution et d'éviter l'augmentation des concentrations de fibres dans l'air.

Les déchets sont conditionnés en doubles sacs dont l'enveloppe extérieure comporte le pictogramme amiante. Puis après avoir atteint une quantité suffisante pour envisager leur sortie de la zone de désamiantage, une procédure de sortie est appliquée (9):

- L'enveloppe extérieure des sacs est aspirée via un aspirateur à filtrations à très haute efficacité= sas de dépoussiérage (sas rouge)
- Passage des sacs dans le compartiment intermédiaire du SAS matériel pour décontamination
- Passage dans le dernier compartiment du SAS matériel (zone verte)

C'est lors du passage entre le SAS intermédiaire et la zone verte du SAS qu'est effectué le double ensachage réglementaire en enveloppant les sacs d'une deuxième épaisseur de polyane.

Une fois les déchets doublement ensachés, les sacs sont regroupés dans des « Big-Bag ». Le conditionnement en « Big-Bag » est obligatoire afin d'obtenir l'autorisation d'accéder à un centre d'enfouissement technique. Notons que les dimensions de ces sacs varient selon les filières d'inertage ou d'enfouissement.

En fin de chantier ou lorsque le volume de déchet est suffisant pour remplir un camion, les déchets sont conduits :

- Soit dans une installation de stockage de déchets non dangereux pour les matériaux d'amiante lié et ayant gardé leur intégrité

- Soit dans une installation de stockage de déchet dangereux pour les autres matériaux

Conformément à l'arrêté du 17 octobre 1977, à l'arrêté du 4 janvier 1985 et au décret du 8 août 1988, les déchets générés par le chantier concernent :

- L'amiante provenant des matériaux contenant de l'amiante
- L'ensemble des consommables souillés
- Les combinaisons
- Les gants
- Les surbottes
- Les préfiltres, filtres et filtres très haute efficacité des masques respiratoires, des aspirateurs, des groupes déprimogènes et des unités de filtration des rejets d'eau
- L'ensemble des matériaux non décontaminables ou dont le lavage nécessite une opération fastidieuse ; les outils ou accessoires que ne peuvent pas être décontaminés par passage à la douche (brosses métalliques etc.)
- Les produits ou matériels ne pouvant être décontaminés.

I.7 La gestion des déchets amiantés par enfouissement :

Les sites de stockage et d'enfouissement d'amiante doivent répondre à des critères spécifiques. Ces derniers sont complexes et leur réalisation ne mène pas systématiquement à l'obtention d'un permis d'exploitation. Dans certains cas, les riverains peuvent s'opposer à la construction de ces sites et obtenir gain de cause comme ce fut le cas à Niederbronn-les-Bains (Niederbronn-les-Bains). Il faut dire que l'implantation d'un centre d'enfouissement induit une modification de la topographie et engendre des nuisances pour les riverains.

Parmi les critères d'obtention du permis d'exploitation on retrouve (22):

- Un éloignement de 200m des premières habitations.
- Géologie/hydrogéologie : la problématique eau constitue un enjeu majeur sur les sites d'enfouissement et de stockage. Il ne s'agit pas uniquement d'un vecteur de migration d'une potentielle fuite des polluants stockés, mais aussi une cible potentielle (eaux superficielles, eaux souterraines). Ainsi une couche d'eau moins 5 mètres avec un coefficient de perméabilité $K = 1.10^{-6}$ m/s et surmontée d'une couche de 1 mètre à $K = 1.10^{-9}$ m/s.
- La proximité des centres de production et la qualité du réseau routier.

Ce dernier point est intéressant au vu du nombre insuffisant des centres d'enfouissement et de leur répartition déséquilibrée sur le territoire. Dans certaines régions, les déchets amiantés devront parcourir de longues distances avant d'atteindre le centre de traitement.

Notons aussi que ces permis d'exploitation ont une durée limitée dans le temps qui peut être prolongée. Néanmoins, l'exploitation prend fin lorsque le site atteint sa capacité maximale, c'est-à-dire lorsqu'il est plein. A partir de là, se pose la question du contrôle de l'état des déchets après la fin du permis d'exploitation. Déchets qui rappelons le, demeurent sous la responsabilité de leur producteur.

Soulignons enfin que le risque d'infiltration dans le sol ou de migration peut se produire alors que l'exploitation commerciale du site est terminée et que ces phénomènes peuvent prendre plusieurs années avant d'impacter le milieu naturel. Les risques liés à la dissémination de fibres et/ou de leur transfert vers les eaux souterraines ou superficielles doivent être maîtrisés pendant et après l'exploitation du site.

Il existe actuellement en France 11 installations de stockage des déchets industriels spéciaux autorisés à accepter ces déchets pour un coût de 600 euros la tonne :

Tableau 2 : Répartition des centres d'enfouissement en France

Département	Commune	Exploitant de l'installation
14-Calvados	Argences	CGEA ONYX
21-Côte d'or	Drambon	SITA FD
30-Gard	Bellegarde	SITA FD
49-Maine et loire	Champteussé/Baconne	SEDA
53-Mayenne	Changé	SECHE EXO Industrie
54-Meurthe et Moselle	Jeandelaincourt	SITA FD
55-Meuse	Laimont	DECTRA
70-Haute Saône	Vaivre	SITA CENTRE EST
76-Seine Maritime	Tourville la rivière	SERAF
77-Seine et Marne	Villeparis	SITA FD
78-Yvelines	Guitrancourt	EMTA

En analysant ce tableau, on remarque que les décharges habilitées à recevoir des déchets amiantés sont très mal réparties en France (le sud étant très mal desservi). Les pouvoirs publics prévoyaient que 400000 tonnes d'amiante seraient enlevées chaque année et ce ne sont que 150000 qui sont admises en centre d'enfouissement technique. En effet, un grand nombre de déchets se retrouve dans les rivières ou au coin d'une route du fait de l'absence de centre d'enfouissement à proximité.

Figure 7: photo d'un centre d'enfouissement



Important :
équipements
susceptibles
contenir de
et pour
l'amiante est
l'intérieur de

pour les
de
l'amiante
lesquels
confiné à

l'équipement (cas des fours par exemple), l'ensemble de l'équipement est conditionné en double sac et envoyé en centre d'enfouissement. Il n'est aucunement question de retirer l'amiante présent dans l'équipement. Ce dernier est enfoui dans son intégralité.



Figure 8 : photo d'enfouissement intégrale d'équipement contenant de l'amiante

En conclusion, l'amiante (chrysotile et amphibole) a été largement utilisé dans les secteurs industriels et BTP du fait de ses propriétés physico-chimiques et de son coût relativement faible. Néanmoins, la découverte de sa toxicité et de sa cancérogénicité a mené à son interdiction par voie de décret (décret tu 24 décembre 1996). Notons que la dangerosité de ce matériau est liée à son état de conservation et c'est là qu'intervient le repérage de l'amiante au sein des bâtiments et des équipements construits/produits avant le 1^{er} Janvier 1997. Une fois ce matériau repéré, toute opération pouvant entrer en contact avec lui doit suivre un cadre strict car est susceptible d'altérer son état et d'entraîner la libération de fibres. Parmi ces opérations figure le désamiantage qui va être à l'origine de la génération de déchets amiantés.

Au vu des quantités d'amiante utilisées, il est évident que la quantité de déchets amiantés serait importante et à laquelle s'ajouteraient les équipements en contact avec les fibres de ce matériau. Aujourd'hui ces déchets sont principalement acheminés vers des centres d'enfouissement. Néanmoins, leur nombre n'est pas suffisant et cette solution ne met pas fin aux propriétés toxiques de ces déchets. De plus, l'enfouissement des déchets amiantés nécessite un suivi dans le temps de leur état de conservation et laisse la responsabilité de ces déchets à leurs producteurs.

Des alternatives existent et mettent en jeu des procédés thermiques ou thermochimiques capables de mettre fin aux propriétés toxiques de l'amiante et de valoriser le produit de traitement.

II Les modes de traitement alternatifs à l'enfouissement :

A l'inverse de l'enfouissement des déchets amiantés dont les problématiques ont été présentés, les solutions d'intertage permettent de mettre aux propriétés toxiques de l'amiante et dans certains cas à le valoriser. Ces dernières reposent sur deux voies principales : la voie thermique et la voie thermochimique. Notons que certaines technologies vont mettre en jeu un traitement chimique préalable au traitement thermique afin d'utiliser des températures moins importantes (19).

II.1 Les différentes options possibles :

Dans le volet thermique :

- Fusion :

La fusion est le principal mode de traitement thermique de l'amiante. L'utilisation de cette technique permet une destruction de la structure fibreuse de ce matériau et mène à la formation d'un composé vitreux inerte. Du fait de la faible conductivité thermique de ce matériau, cette technique repose sur l'utilisation de température significativement au-dessus du point de fusion (situé entre 1200 et 1500°C selon le type d'amiante) pendant des durées importantes. Dans certains cas, il sera même nécessaire de broyer le déchet afin d'en réduire la granulométrie afin d'en faciliter la fusion (19).

Le traitement de l'amiante *via* cette voie est énergivore et couteux mais permet de traiter tout type d'amiante et aussi tout composé lié à ce déchet.

- Déshydratation :

Le traitement par déshydratation repose sur la transformation de la structure physique et chimique de l'amiante à travers l'évaporation/déshydratation des ions hydroxyles lorsque ce matériau est exposé à des températures allant de 400°C à 900°C. La durée de traitement est variable est une amélioration de la cinétique de déshydrations est possible par broyage préalable. Néanmoins le procédé reste couteux et très consommateur d'énergie. De plus, lorsque l'amiante est lié à des composés organiques, son traitement par déshydratation est susceptible de libérer

des gaz contenant des composés toxiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (19).

Dans le volet thermochimique :

Cette voie combine un traitement thermique avec des températures allant de 80° à 1400°C et un traitement chimique capable d'agir sur l'amiante (19).

- Réaction de l'amiante aux acides :

L'efficacité de ces réactions augmente avec le pH. Les acides vont agir par lixiviation pour dissoudre les composants cations de l'amiante : fer et magnésium. Ce dernier constitue une partie importante de l'amiante chrysotile (33%) et amphiboles (6 à 25%). Ces réactions sont accompagnés d'un traitement thermique afin d'en améliorer la cinétique (19).

Dans le cas du chrysotile le magnésium pourra être lixivié de la surface car il se trouve à l'extérieur de la structure moléculaire. Par contre, les amphiboles ont une plus grande résistance aux acides car le magnésium se trouve à l'intérieur de la structure cristalline.

Parmi les acides capables de lixivier les cations de l'amiante et détruire les structures asbestiformes on peut mentionner l'acide fluorhydrique. Cependant son caractère dangereux rend son utilisation complexe.

- Réaction aux bases fortes :

Les bases fortes, en libérant des ions OH^- , vont agir sur l'amiante et mener en fin de réaction à la formation de cations métalliques sous forme d'hydroxydes.

Des températures de l'ordre 250°C minimum et des pressions de 40bars ainsi qu'un broyage fin sont nécessaires pour obtenir des temps de traitement limités. Notons aussi que ces procédés mettent en jeu de grande quantité de base (presque autant que la quantité de déchets) (19).

- Réactions aux agents minéralisant :

Il s'agit d'utiliser des agents minéralisant qui vont convertir l'amiante en une autre matière minérale non amiantée. L'amiante sera en contact avec des molécules à base de silice qui présentent une forte affinité physico chimique avec ce matériau. De

ce fait, elles se fixeront sur l'amiante et formeront un réseau dense et compact. La cinétique de ce type de réaction est améliorée avec l'élévation de la température (19).

II.2 Revue critique des techniques de traitement et de valorisation de l'amiante :

Après avoir décrit les voies de traitement thermique et thermochimique l'objectif est de présenter les technologies reposant sur ces deux voies pour traiter les déchets amiantés. Lesdites technologies ont en point commun qu'elles sont toutes capables de supprimer les propriétés toxiques des déchets amiantés.

Pour chacune des technologies sélectionnées, une description du procédé de traitement sera effectuée ainsi qu'une présentation de ses avantages et inconvénients. Dans le cas où ces technologies permettent une valorisation de l'amiante traité, le produit de cette valorisation sera décrit.

Notons que quel que soit la technologie utilisée, les sites traitant les déchets amiantés sont soumis à la réglementation ICPE au regard des rubriques suivantes :

- 2718 : transit, regroupement ou tri des déchets dangereux
- 2770 : traitement thermique des déchets dangereux
- 2790 : traitement des déchets dangereux

De ce fait, la mise en œuvre ou l'exploitation d'un procédé de traitement contenant de l'amiante doit être autorisé par la réglementation ICPE (directive européenne n° 2008/98/CE du 19 novembre 2008 ; Annexe I à l'article R511-9 du Code de l'Environnement relative à la nomenclature ICPE).

II.3 Les procédés thermiques : La vitrification des déchets : la torche à plasma (23) (24)

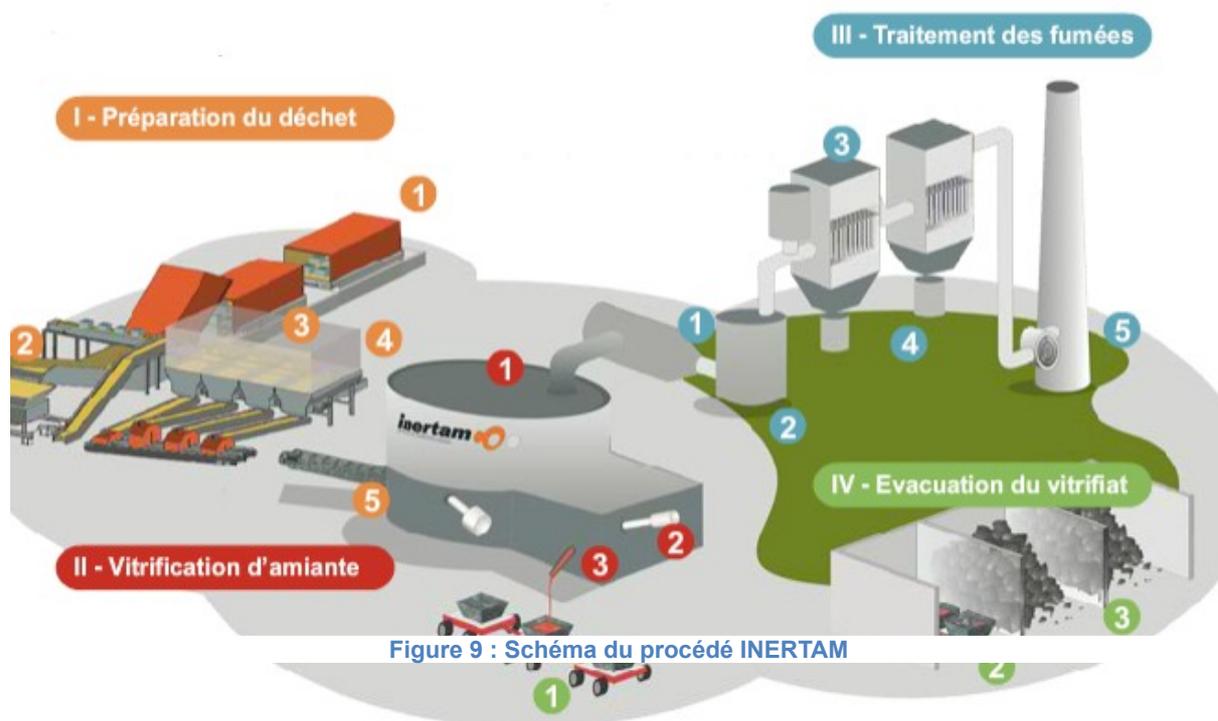
Parmi les procédés de gestion des déchets amiantés figurent la vitrification par torche à plasma. Cette technique est assurée en France par l'entreprise Europlasma à travers le procédé inertam unique en Europe.

Ce procédé dispose d'une capacité de traitement annuel estimé à 8000t et met en jeu un four de vitrification alimenté par 3 torches à plasma inertant 30 tonnes/jour, soit plus d'une tonne/h, en continu.

Légende :

Le procédé VITRIFICATION AU PLASMA

inertam
GROUPE EUROPLASMA



La torche à plasma est un bruleur qui génère un flux thermique sans flamme sous forme d'un fluide appelé plasma : mélange d'électrons libres, d'atomes, de molécules et d'ions, le plus souvent présents dans des états excités.

Cette technologie nécessite la création d'un arc électrique continue par le passage d'un courant électrique à travers un gaz par un procédé appelé claquage électrique qui permet de générer de la chaleur à travers la résistance électrique du système. Chaleur qui va ioniser le gaz produisant ainsi le plasma. En effet, à 2000°C, les molécules du gaz se dissocient à l'état atomique et lorsque la température atteint les 3000°C elles perdent leurs électrons et deviennent ionisées. Ce gaz devient alors visqueux à pression atmosphérique et capable de communiquer une très forte énergie à un matériau.

II.3.1 Procédé :

Le système plasma par INERTAM est un système de torches à arc soufflé d'une puissance électrique de 1750kw dont 1435kw sont restitués. Le gaz plasmagène utilisé est l'air et la ligne de vitrification des déchets amiantifères se compose de 5 parties :

- Un système de contrôle de commande qui gère l'ensemble de l'installation 24h/24
- Un système de stockage et de tri des déchets par catégorie selon leur fusibilité (capacité à fondre) : silicés, calcium d'origine fibrociment ; plâtreux particuliers contenant des éléments soufrés, combustibles tels que EPI, dalles de sol...
- Un système plasma constitué d'une torche à arc soufflé et ses auxiliaires
- Un système d'enfournement des colis assurant une cadence de chargement régulière selon leur hétérogénéité de forme et de poids
- Un four de haute température d'une capacité 1t/h équipé d'une chambre de postcombustion pour un temps de séjour de gaz de 2 secondes à 1200°C (assurée par un bruleur auxiliaire). Ce four est équipé de réfractaires, de capteurs et de prise de prélèvement de gaz.
- Un système de traitement des fumées de type semi-humide (aucun rejet d'effluent liquide).

Le procédé permet le traitement par plasma thermique à arc soufflé de déchets contenus dans des colis de 230kg. Ces derniers sont conditionnés en fûts

métalliques ou en sacs big-bags et contiennent en proportions variables des éléments inertes (amiante, verre, gravas...) et des combustibles (déchets plastiques, textiles...). Le cycle de traitement des déchets est de 1 tonne par heure.

Dans le four où la température du bain est maintenue à 1600°C, les déchets sont introduits devant le nez de la torche et sont alors soumis au dard plasma ($T > 4000^{\circ}\text{C}$). Ainsi, la partie combustible du déchet est gazéifiée et les parties minérales sont fondues. Le four est équipé d'un trou de coulée permettant l'évacuation du bain à l'extérieur.

Les gaz générés par le traitement thermique vont subir différentes phases de traitement puis analysés afin de contrôler le taux de poussières et les concentrations en différents gaz lors de leur aspiration vers une cheminée haute de 15m. Notons que les cendres secondaires et les sels de neutralisation sont récupérés puis réintroduits en tête de traitement moyennant un traitement adéquat.

II.3.2 Résultat :

Le traitement de l'amiante par inertage entraîne une transformation totale des fibres. De plus, aucune pollution par les fibres n'est présente dans les fumées que ce soit dans le centre de traitement ou au voisinage.

- Bilan en masse (bilan moyen) : pour une tonne de déchets entrante : 85% de vitrifiat, 14% de gaz et 1% de cendres secondaires.
- Vitrification : la réduction du volume de déchets introduits est de 80%. Le produit de fusion obtenu (vitrifiat) est un matériau inerte et valorisable.

II.3.3 Avantages :

Le procédé permet de nombreux avantages à savoir :

- Absence d'énergie fossile (absence de combustion)
- Souplesse d'utilisation, facilité de démarrage
- Assurance d'inertage complet des matières traitées
- Minimisation de la formation de polluants organiques persistants

II.3.4 Inconvénients :

Tout d'abord, le recours à la torche à plasma pour générer des hautes températures entraîne une consommation énergétique importante. Un projet permettant de récupérer de l'énergie au cours du procédé pour la réinjecter est en

cours de test. D'autre part, l'utilisation de la torche à plasma entraîne des dépenses d'entretien et de maintenance importantes du fait de la dégradation du revêtement du four. Ce dernier est changé environ 2 à 3 fois par an et nécessite 4 semaines d'arrêt, ce qui représente un impact financier conséquent.

Ces points limitatifs se répercutent sur le coût de traitement jugé encore élevé par les professionnels du secteur. Néanmoins, les projets en cours tels que la récupération et la réutilisation d'énergie et les nouvelles débouchées du Cofalit permettraient d'abaisser le coût de traitement.

II.3.5 Valorisation du vitrifiat :

II.3.5.1 Le Cofalit :

Le produit de valorisation du procédé Inertam est le Cofalit commercialisé 5 euros/tonnes est principalement utilisé aujourd'hui en sous-couches dans les travaux. Si cette voie est une source de revenu supplémentaire, elle n'est pas suffisante pour réduire le coût de traitement qui demeure le principal inconvénient du procédé INERTAM.

L'un des principaux projets de développement consiste à améliorer la valorisation du Cofalit à travers son utilisation comme matériau de stockage de chaleur (25) (26).

Présentation de l'étude :

Dans le cadre de cette étude (25) (26), le Cofalit issu de la vitrification des déchets amiantés à très haute température est analysé afin de valider son utilisation comme matériau de stockage thermique par chaleur sensible dans les centrales électro-solaires de nouvelle génération. Ses propriétés thermo-physiques, son faible coût et sa grande disponibilité en font un candidat potentiel pour le stockage thermique.

L'étude s'intéresse à deux variétés de Cofalit l'une vitreuse issue d'un refroidissement rapide et l'autre céramique du fait d'un refroidissement plus lent. Cette hétérogénéité de structure est due à une vitesse de refroidissement non contrôlée dans la chaîne du procédé INERTAM. Ainsi lors de la coulée, la partie en contact avec la lingotière se vitrifie car le refroidissement est rapide alors que la partie centrale se refroidit beaucoup plus lentement et forme une céramique.

En considérant que les propriétés thermo physiques du matériau peuvent dépendre de sa structure, les deux variétés de Cofalit ont été testées.

Les premiers tests ont porté sur la réactivité du Cofalit (vitreux et céramique) lors de son exposition à des températures allant de l'ambiante jusqu'à 1000°C. L'objectif étant de déceler d'éventuelles transformations du matériau. Ce test a démontré que le Cofalit sous sa forme céramique est stable sur toute la gamme de température balayée tandis que la forme vitreuse connaît un pic de transition vitreuse à 713°C puis un pic de cristallisation à 938°C. De ce fait, la forme vitreuse ne peut être utilisée qu'au sein de centrales de moyenne capacité (température ne dépassant pas les 500°C) tandis que la forme céramique peut être utilisée dans des centrales de moyenne et de haute capacité.

Par la suite, une comparaison de différents paramètres du Cofalit (densité, capacité calorifique, conductivité thermique etc.) avec d'autres matériaux de stockage par chaleur sensible (sels fondus, céramique haute température, bétons haute température) a été réalisée. Cela a permis de démontrer que le Cofalit dispose :

- D'une capacité de stockage thermique équivalente à celles des céramiques haute température (HT) et du béton mais demeure inférieure à celle des sels fondus.
- D'une meilleure conductivité thermique que les sels fondus, les céramiques (HT) et le béton HT.
- Que le coût d'utilisation du Cofalit pour le stockage thermique est largement inférieur à celui des autres matériaux.

Enfin, la résistance du Cofalit aux chocs thermiques a été expérimentée. Selon l'étude, les matériaux de stockage thermique des centrales solaires sont soumis à de fortes variations de températures. Il est donc question d'évaluer la résistance du Cofalit afin de juger de sa potentielle utilisation comme matériau de stockage.

Pour cela, un barreau de Cofalit équipé de trois thermocouples est soumis aux paraboles du four solaire d'Odeillo (laboratoire PROMES-CNRS). Ce dernier est capable d'exposer les matériaux à des flux solaires concentrés (aux alentours de 1000 soleils). Cette exposition permet d'augmenter la température de surface de plusieurs centaines de degrés de façon instantanée.

En conclusion, cette étude a permis de démontrer que le Cofalit est capable de résister à des variations de température sur un intervalle allant de la température l'ambiante à 1000°C. Ainsi, le Cofalit peut être employé pour des applications de stockage d'énergie solaire de moyennes concentrations (200-400°C) et pour les centrales à tour nouvelles générations (1000°C).

D'autres types d'applications pour les produits d'inertage thermique de l'amiante (différent du Cofalit) ont été étudiés :

- Une étude (27), a mis en évidence la production de géopolymère à partir d'un mélange d'hallyosite et de vitrifiat réduisant par la même occasion le coût de production de géopolymère. En effet, l'utilisation du vitrifiat permet de réduire la quantité d'hallyosite employée pour la production du géopolymère. Ces derniers sont utilisés comme ciment, mortier et entrent dans la fabrication de céramique. Le produit issu de la valorisation du vitrifiat dispose de bonnes caractéristiques mécaniques, d'une bonne résistance à la température ainsi qu'aux agressions chimiques.
- Une autre étude (28), a utilisé le vitrifiat issu de l'inertage de ciment amianté comme constituant d'un ciment produit à basse énergie. En effet, le vitrifiat a été considéré comme source suffisante pour la production de ciment. Cette étude a aussi démontré que ce procédé de production de ciment est moins libérateur de CO₂ que les procédés traditionnels.

II.4 Les procédés thermochimiques : ARI TECHNOLOGIES (29) (30) (31):

Une autre méthode de traitement des déchets amiantés est la minéralisation brevetée par la société ARI technologie capable de traiter 37tonnes/jour, 24h24. Il s'agit de traiter les déchets amiantés par un agent minéralisant puis de les exposer à la chaleur pendant un temps suffisant pour déminéraliser l'amiante et lui faire perdre ses propriétés toxiques. L'agent minéralisant est de préférence un borate de métal alcalin soluble dans l'eau ou un silicate de métal alcalin. Dans les faits, l'agent minéralisant est utilisé comme un agent mouillant qui peut être appliqué directement lors du retrait des déchets amiantés ou lors de son arrivée sur le site de traitement.

Le niveau de concentration de l'agent minéralisant est fonction de la température et du temps pendant lequel le mélange (déchet amianté + agent minéralisant) sera exposé à cette température. En effet, la température nécessaire pour déminéraliser

l'amiante varie entre 500°C et 1700°C. A une température de 500°C, le temps nécessaire pour effectuer cette opération peut être long pour une utilisation industrielle alors que pour des températures de 1700°C le coût de l'opération ne serait pas viable. Par conséquent, il est nécessaire d'optimiser la technique en choisissant des concentrations d'agent minéralisant permettant une température comprise entre 750°C et 1500°C.

II.4.1 Procédé

Le procédé comprend 4 phases :

II.4.1.1 Phase d'alimentation :

Les déchets amiantés conditionnés en sacs de type big-bag sont placés sur un tapis d'alimentation. Ils se dirigeront vers une trémie qui les acheminera vers une broyeuse/déchiqueteuse afin de :

- De réduire la taille des déchets.
- Homogénéiser le traitement avec les agents minéralisant injectés.
- Améliorer la cinétique et le rendement du procédé en augmentant les surfaces d'échange (déchet / agents minéralisant).

Un système va par la suite compacter les déchets sous forme de brique afin d'en augmenter la densité et la conductivité thermique. Ces briques seront introduites dans un four à foyer rotatif largement utilisé par l'industrie sidérurgique.

II.4.1.2 Phase de traitement dans le foyer rotatif :

Les briques de déchets amiantés présentes dans le four sont de tailles différentes. Il en résulte des délais de traitement hétérogènes. Pour remédier à cela, un système utilisant deux arbres à couteaux tournant en sens contraire sur le plateau du four est installé. Ainsi, les briques seront fragmentées selon une granulométrie homogène et par la même occasion étalées au sein du four pour une exposition thermique similaire.

Il est à noter que cette fragmentation à l'intérieur du four est libératrice de fibres. Ces dernières, seront immédiatement converties en minéral non asbestiforme du fait de la température élevée du four.

II.4.1.3 Phase de sortie et de refroidissement :

A leur sortie du four, les déchets minéralisés vont subir un refroidissement lent afin de permettre au processus de conversion thermochimique de se poursuivre. De ce fait, le temps de séjour des déchets dans le four est réduit entraînant par la même occasion une réduction de la consommation énergétique du process. Néanmoins, cela entraîne des contraintes techniques afin d'assurer une manutention sans danger des matières à haute température.

- Four à foyer rotatif : Les briques sont poussées dans le foyer où elles seront soumises à une température de 1200°C pendant +/- 20 min. A partir de là, les déchets amiantés auront perdu leurs propriétés toxiques. Le four peut être alimenté par un combustible fossile ou à l'électricité.
- Un système permettant de sortir les déchets minéralisés du four, un refroidissement dans l'eau et un stockage dans des containers.
- Un système de traitement des fumées qui comprend un refroidisseur, un module d'oxydation thermique (traitement des émissions de composés organiques 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).

Les déchets amiantés sont alimentés dans une trémie, disposant d'une ouverture spécifique et d'une goulotte blocable qui les acheminera vers une broyeuse/déchiqeteuse. Cette dernière permet :

- Une réduction de la taille des déchets.
- Une homogénéisation du traitement *via* les agents minéralisant injectés.
- Une amélioration de la cinétique et du rendement du procédé en augmentant les surfaces d'échange.

Le mélange déchets/agents mouillant (minéralisant) est acheminé vers une chambre de séchage. A partir de là, il se dirige vers la chambre de traitement thermique où l'amiante perdra ses propriétés toxiques. Suite à ce traitement les déchets minéralisés sont déposés dans des containers.

Le système comprend aussi des filtres et des appareils de traitement. Leur rôle est de capter et d'éliminer des gaz issus de la combustion d'élément organique

associés aux déchets amiantés ou aux matériaux dans lesquels les déchets ont été entreposés (big-bags par exemple).

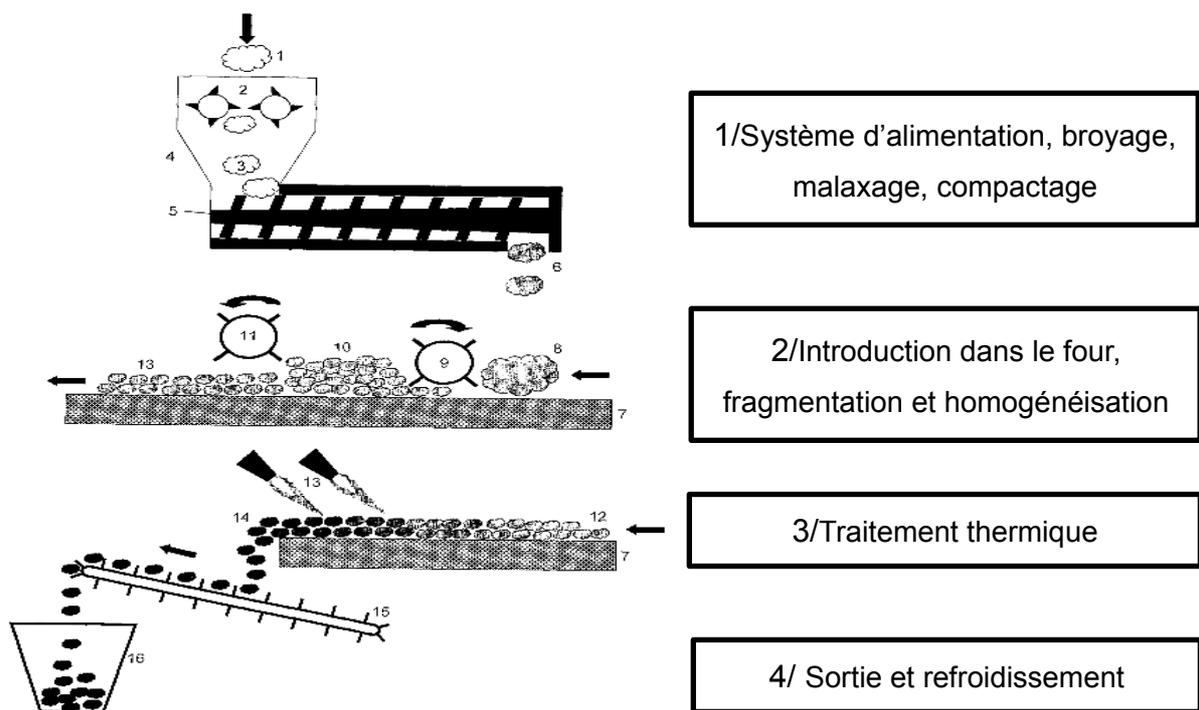


Figure 10 : schéma du procédé ARI TECHNOLOGIE

II.4.2 Valorisation :

Les produits obtenus en sortie de four sont des roches silicatées de type Diopside, pyroxènes et Olivine valorisables en sous-couche routière. Cette valorisation permet de réduire le coût de traitement et empêche la génération de frais d'élimination.

II.4.3 Avantages et inconvénients :

Ce procédé permet un traitement définitif de l'amiante avec un produit valorisable qui n'entraîne pas de coût d'élimination. Les tests effectués ne détectent aucune fibre résiduelle et les mesures d'empoussièrement sont inférieures à $1f/cm^3$.

La technologie utilisée est maîtrisée et permet de traiter des quantités industrielles de déchets amiantés à un coût comparable à l'enfouissement ce qui représente un réel atout.

Néanmoins, cette technique de traitement n'est pour l'instant commercialisée qu'en Angleterre où le prix de stockage en centre d'enfouissement est élevé ce qui

en fait une réelle alternative. De plus les produits obtenus en fin de traitement sont faiblement valorisables.

II.5 Les procédés thermochimiques : Projet VALMIANTE (32)

Le projet VALMIANTE est porté par la société méditerranéenne des zéolithes en partenariat avec l'université de Haute-Alsace et de l'ADEME. Son objectif est de valoriser les déchets d'amiante libre issus de décalorifugeage et de déflocage en un cristal appelé zéolithe utilisé dans l'industrie comme catalyseur et support de filtration.

II.5.1 Procédé :

Le procédé utilisé pour la valorisation des déchets amiantés en zéolithe comporte deux phases successives.

Tout d'abord, une attaque acide du déchet qui conduit à la génération d'un matériau intermédiaire (MI). Puis, une attaque hydrothermale de ce matériau dans but de synthétiser les zéolithes.

Les déchets ont été sélectionnés selon leur dangerosité et la facilité avec laquelle ils se délient. Au final, 90% étaient constitués de chrysotile ; les amphiboles chrocidolite ou amosite n'étant que rarement utilisées en flocage.

II.5.1.1 Phase 1 : Inhibition de la dangerosité spécifique de l'amiante :

La phase 1 a pour objectif l'amorphisation et la destruction totale des déchets chrysotile par une attaque à l'acide sulfurique (H_2SO_4). Pour y parvenir, les déchets sélectionnés sont immergés pendant au moins 30 jours dans une solution d'acide sulfurique à température ambiante et à pression atmosphérique. L'analyse de plusieurs échantillons issus de la phase 1 (diffraction des rayons X) démontre une disparition complète des raies caractéristiques de l'amiante chrysotile.

Suite à cette réaction déchet + acide on obtient un matériau intermédiaire + une solution. Le tableau ci-dessous détaille la composition des différents éléments de cette réaction pour des déchets homogènes de chrysotile :

Tableau 3 : Réaction pour des déchets homogènes

Déchet	+ Acide	▶▶▶	MI (Solide)	+Solution
100%	Ratio L/V 10/1		53%	47%
Composition :				
SiO ₂ 47%			SiO ₂ 87,3%	SiO ₂ 0,3%
MgO 29%			MgO 0,8%	MgO 88,2%
Divers 24%			Divers 12,5%	Divers 11,5%

(dont quartz 6%)				
---------------------	--	--	--	--

La quantité de SiO₂ et de MgO obtenue en bout de chaîne dépend de qualité (homogénéité en chrysotile) en entrée de procédé. Pour 100kg d'amiante chrysotile homogène, on obtient environ 40kg de SiO₂ et 30kg de MgO. Aussi, la majeure partie de la silice (SiO₂) nécessaire à l'altération hydrothermale menant à la production de zéolithe se trouve dans le matériau intermédiaire solide.

Dans le cas de déchets amiantés issus de chantiers caractérisés par la présence de fortes proportions de gypse le bilan de la réaction de phase 1 est moins avantageux. En effet, pour 100kg de déchet traités, on obtient 14 kg de silice.

II.5.1.2 Phase 2 : Valorisation de déchets amiantés

La destruction de l'amiante chrysotile par une attaque à l'acide génère une matière intermédiaire riche en silice qui sera utilisée en phase 2 pour synthétiser des zéolithes. Afin d'y parvenir, la MI entre dans une seconde réaction faisant intervenir de la soude, de l'alumine, de l'eau et permet la valorisation par altération hydrothermale ou en milieux fluorés du produit de la phase 1.

A l'issue de cette phase 2, les solides formés ont été identifiés par diffraction des rayons X dont les résultats ont démontré :

- Une qualité cristalline satisfaisante des zéolithes.
- Une disparition totale de la morphologie fibreuse de la MI (silice)
- La présence des cristaux caractéristiques des zéolithes.

II.5.2 Avantages :

En dépit de limites citées ci-dessus, la solution Valamiente permet un traitement :

- Econome en énergie
- Détruisant les fibres d'amiante et formant une MI constituée de fibres rugueuses, non élastiques, amorphes et ne possédant de caractère pénétrant.
- Valorisation des déchets amiantés en un matériau commercialisable et à forte valeur ajoutée.

Aussi, d'autres voies de valorisation sont en cours d'études. La première concerne la commercialisation avec traitement préalable du magnésium issu de la

phase 1 comme amendement magnésien agricole. Une autre voie serait d'utiliser les MI comme flocculant dans le traitement physico-chimique des eaux usées.

II.5.3 Inconvénients :

Le principal inconvénient du procédé Valamiente réside dans la nécessité d'avoir des déchets d'amiante homogène. En effet, les produits issus du traitement (phase 1) de déchets hétérogènes ne sont pas suffisamment riches en silice pour permettre une valorisation en zéolithe. Dans le même contexte, la valorisation ne concerne que des déchets de chrysotile, les amphiboles par exemple ne peuvent être que dénaturés.

Notons aussi la durée nécessaire au traitement qui est d'au moins 30 jours. Cette durée pose la question de la capacité du procédé à traiter des flux importants de déchets.

Dernier point et non des moindres, la solution Valamiente n'est toujours pas commercialisée à l'heure où ces lignes sont écrites, le procédé étant encore au stade de pilote laboratoire.

II.6 Les procédés thermochimiques : Procédé SUMITOMO OSAKA CEMENT (33)

L'entreprise Japonaise SUMITOMO OSAKA CEMENT a émis un brevet qui décrit un procédé de traitement de tout type d'amiante et une valorisation de ce matériau en ciment (clinker).

II.6.1 Procédé

Le procédé utilisé repose sur un traitement par voie thermochimique. Les matériaux amiantés de tout genre sont traités en deux phases. Durant la première, ils entreront en contact avec un acide à fort pH (fluorhydrique, nitrique, sulfurique, phosphorique, mélange etc.) qui aura pour objectif de dénaturer l'amiante et lui faire perdre sa structure fibreuse. Ici le temps de réaction dépendra de la concentration de l'acide utilisé. La deuxième phase quant à elle, consiste à introduire le produit de la phase 1 dans un four à foyer rotatif pour un processus de fusion qui aboutira à la valorisation de l'amiante en matière première pour l'industrie cimentière.

II.6.2 Avantages et inconvénient

Cette technologie permet de traiter tout type de déchet amiantés en deux phases. La première permet de détruire la structure fibreuse de l'amiante et la deuxième mène à la production d'un matériau valorisable sous forme de clinker qui est une matière première pour la fabrication de ciment. Néanmoins, cette technologie demeure dans la phase brevet et test. De plus, l'utilisation d'acide à grande échelle induit de nouvelles problématiques en lien avec leur dangerosité. Aussi, l'introduction de déchets amiantés au sein des fours des cimentiers nécessitera des modifications techniques (mise au point de nouveau procédé, gestion des poussières etc.) et une acceptation sociale (risque santé pour le personnel).

II.7 Les procédés thermochimiques : Procédé NEO ECO RECYCLING/Procédé de traitement d'un solide amiante (34)

Ce procédé actuellement développé par NEO ECO RECYCLING (bureau d'étude en ingénierie) est basé sur un brevet déposé par l'institut national polytechnique de Toulouse dont les inventeurs sont M. Denis Ghislain et M. Michel Delmas. Il s'agit d'un procédé de traitement mobile installé directement sur les chantiers de désamiantage.

La terme solide amiante utilisé désigne toute matière solide contenant au moins une quantité d'amiante.

La technologie utilisée repose sur une attaque acide de l'amiante à chaud. Cette attaque est réalisée par une solution d'acide chlorhydrique à pression atmosphérique et à une température voisine de la température d'ébullition de la solution aqueuse dudit acide. Cela permettra la formation :

- D'une solution dite non silicique contenant les composant non silicique de l'amiante. Au sein de cette solution on retrouve des espèces cationiques du fer, du magnésium sous forme de chlorure de fer et de chlorure de magnésium.
- D'un solide, dit solide silicique sous forme de silice amorphe poreuse ne présentant pas la toxicité de l'amiante.

Dans un deuxième temps, les produits présents dans la phase liquide seront valorisés sous forme d'hydroxyde et de chlorure.

II.7.1 Procédé :

Le procédé permet le traitement de tout type d'amiante et est constitué de deux phases :

- La phase d'inertage et de récupération de silice
- La phase de valorisation des co-produits présents dans la solution aqueuse

La phase de traitement est réalisée dans une unité mobile directement sur chantier et la phase de valorisation nécessite une installation fixe.

II.7.1.1 Phase d'inertage :

Cette phase démarre par une étape initiale de broyage des déchets amiantés. L'objectif est de réduire la granulométrie et d'augmenter par la même occasion la surface de contact lors de l'étape suivante. Notons qu'un broyage fin va faciliter l'attaque acide mais va aussi augmenter le temps de broyage et donc son coût.

Une fois le déchet broyé il est transféré dans une cuve où il est mélangé avec de l'acide chlorhydrique et malaxé jusqu'à ce que la structure fibreuse soit détruite, le tout sous une température de 90°C. Un test par diffraction des rayons X sera utilisé sur chantier afin de s'assurer que l'amiante a été inerté.

La réaction de l'amiante avec l'acide chlorhydrique se présente de la sorte :



Au terme de cette étape, l'amiante est dissoute et on obtient comme précisé précédemment un produit silicique (phase solide sous forme SiO₂) et une solution contenant des espèces cationiques du fer et du magnésium. La phase solide sera récupérée par filtration puis lavage avec 600L d'eau pour éliminer l'acide chlorhydrique et les sels résiduels. Il faut noter que l'eau de lavage pourra être réutilisée dans le process.

II.7.1.2 Phase de valorisation :

La phase liquide est traitée afin d'en extraire les coproduits valorisable par précipitation sélective des espèces du fer et de l'aluminium puis filtration. Exemple pour le fer :



A ce niveau, la phase liquide contient encore des chlorures de Magnésium ($MgCl_2$) et de Calcium qui sont récupéré par évaporation. L'eau et les résidus de HCl évaporés par condensation sont réintroduits.

$MgCl_2 \Rightarrow$ Evaporation \Rightarrow 80Kg de $MgCl_2$.

II.7.2 Avantages et inconvénient :

Le procédé décrit ci-dessus est en phase de test et la DREAL demande la mise en place d'un pilote industriel fixe avant d'envisager la propriété mobile de cette technologie. Le coût de traitement envisagé est estimé à 200 euros HT/tonne ce qui pourrait concurrencer sérieusement l'enfouissement car cette solution permet un traitement directement sur chantier. A cela s'ajoute la possibilité de valorisation des déchets amiantés en silice.

Notons tout de même que c'est dans la qualité et la pureté de la silice obtenue que réside la réussite de cette technique de traitement. Cette pureté dépend de la typologie du déchet en input et des conditions de mises en œuvre sur le terrain (temps de broyage, temps d'exposition à l'agent acide etc.).

II.7.3 Procédé similaire : CAPENA/LACOUT

Ce procédé similaire à celui de NEO ECO RECYCLING (35); s'applique à l'ensemble des déchets amiantés et repose sur une attaque par acide. Le déchet amianté est mélangé à de l'acide chlorhydrique au sein d'une enceinte autoclave qui est porté à une température supérieur de $200^\circ C$ pendant 48h.

Cette technique permet de valoriser l'amiante en rhabdophane et apatite. Néanmoins elle n'a pour l'instant était testé qu'en laboratoire sur de petites quantités de déchets et est à la recherche d'un pilote industriel.

II.8 Les procédés autres : Traitement des déchets amiantés par micro-ondes (36)

Cette technique a été utilisée au Japon pour le traitement des débris amiantés issus du tremblement de terre suivi du tsunami qu'a connu le pays le 11 mars 2011. En effet, ces catastrophes naturelles ont détruit de nombreux immeubles induisant la génération de multiples débris parmi lesquelles figurent des débris amiantés. Les capacités d'enfouissement de ces débris étant limitées il a été convenu de les traiter thermiquement (inertage par torche à plasma). Cependant, les centres d'inertage (au

nombre de 20 au Japon) ne cessaient de recevoir des déchets amiantés qui s'empilaient en attente de traitement et c'est pour remédier à cela que cette étude a été réalisée.

II.8.1 Expérience

Dans le cadre expérimental de cette étude des déchets contenant de la chrysotile (sous forme d'amiante –ciment) ont été sélectionnées. Ces déchets (taille : 0,5*3*3 cm) sont installés dans une chambre (thermiquement isolée) et exposés à des micro-ondes produites par un générateur (magnétron) dont la puissance atteint 1500W et la fréquence 2,45Ghz. La chambre thermiquement isolée permet de retenir la chaleur générée par les micro-ondes. Tout le long du procédé, un thermocouple et un pyromètre (double-contrôle) mesurent la température des déchets.

Les déchets sont exposés à deux températures 800 et 900°C (puissance du générateur à micro-onde 1325 et 1486W). Une fois que les échantillons exposés aux micro-ondes atteignent ces températures, l'apport d'énergie est réduit et ces températures sont conservées pendant une minute. Par la suite, le four à micro-ondes est éteint et les échantillons refroidissent. Ce procédé est rapide car l'intérieur du four n'a pas besoin de chauffer pour permettre le traitement des déchets et est moins gourmand en énergie que le traitement de l'amiante par fusion.

II.8.2 Application sur le terrain :

En se basant sur le modèle expérimental précédemment cité, un centre de traitement des débris amiantés par micro-ondes a été installé dans la ville Natori sujette aux catastrophes naturelles qu'a connu le Japon en 2011. Ce centre est capable de traiter 2000 kg/jour de déchets amiantés. Pour assurer cette capacité, une source d'énergie doit être utilisée pour alimenter le process et le choix s'est porté sur les débris de bois (planches et les piliers) générés par la catastrophe. Ainsi, le premier compartiment du système de traitement est constitué d'un four capable de recevoir jusque 160kg/h de débris de bois. Notons que pour faciliter la combustion du bois contenant une forte teneur en eau suite au tsunami, du kérosène a été ajoutée. Le gaz issu de la combustion du bois est dirigé vers le four à micro-ondes avec un débit de 70-100m³/min et une température de 700 à 1000°C.

La deuxième partie du système est constitué d'un four à micro-onde disposant de trois magnétrons chacun d'une puissance de 7kW. Les déchets amiantés mélangés

avec d'autres matériaux tels que des pierres ou du béton sont introduits dans le four à micro-ondes par un sas d'alimentation.

Le nombre de fibres d'amiante après traitement a été analysé pour deux températures 750 et 900°C. Les résultats démontrent qu'aucune fibre n'est présente après traitement des déchets à 900°C alors que 9 fibres/3000 particules ont été retrouvées après un traitement à 750°C. La réglementation japonaise stipulant que les matériaux disposant de plus de 3 fibres/3000 particules doivent être traités.

Le gaz rejeté dans l'atmosphère est à une température inférieure à 650°C. Aussi des filtres sont installés afin récupérer les particules contenues dans ce gaz. Les dioxines connues pour être produites lors de la combustion du bois ont été surveillées et ne dépassent pas la valeur réglementaire japonaise de 5ng TEQ/g (toxique équivalent).

II.8.3 Avantages :

Si la plupart des méthodes de traitement des déchets amiantés utilisent des températures atteignant les 1600°C, cette étude a démontré qu'il est possible de passer sous le seuil réglementaire des 3fibres/3000 particules (Japon) avec des températures inférieures. En effet, le traitement de ces déchets par micro-ondes à 800°C permet d'atteindre le même objectif réglementaire le tout en transformant l'amiante en silicates non fibreux. Cette transformation des déchets amiantés est possible par une augmentation rapide de la température à l'intérieur des matériaux amiantés du fait de la forte capacité de pénétration des micro-ondes à 2,45GHz. Aussi, l'utilisation de ce système a permis d'éliminer complètement les fibres d'amiante à une température comprise entre 900 et 950°C.

II.8.4 Le procédé ATON-HT (37) :

Le procédé ATON-HT reprend le principe de la technologie sus-citée. Il utilise un champ électromagnétique (micro-ondes) pour le traitement thermique des déchets amiantés ayant été traité au préalable par un agent minéralisant. Cela permet de réduire considérablement la consommation énergétique du système car les micro-ondes chauffent le déchet dans l'intégralité de son volume. Pour l'instant cette technologie est peu répandue et la société la commercialisant travaille sur une unité capable de traiter 1 tonne de déchets par heure. Le coût final de traitement annoncé est extrêmement compétitif (110 € / tonne) mais reste à confirmer.

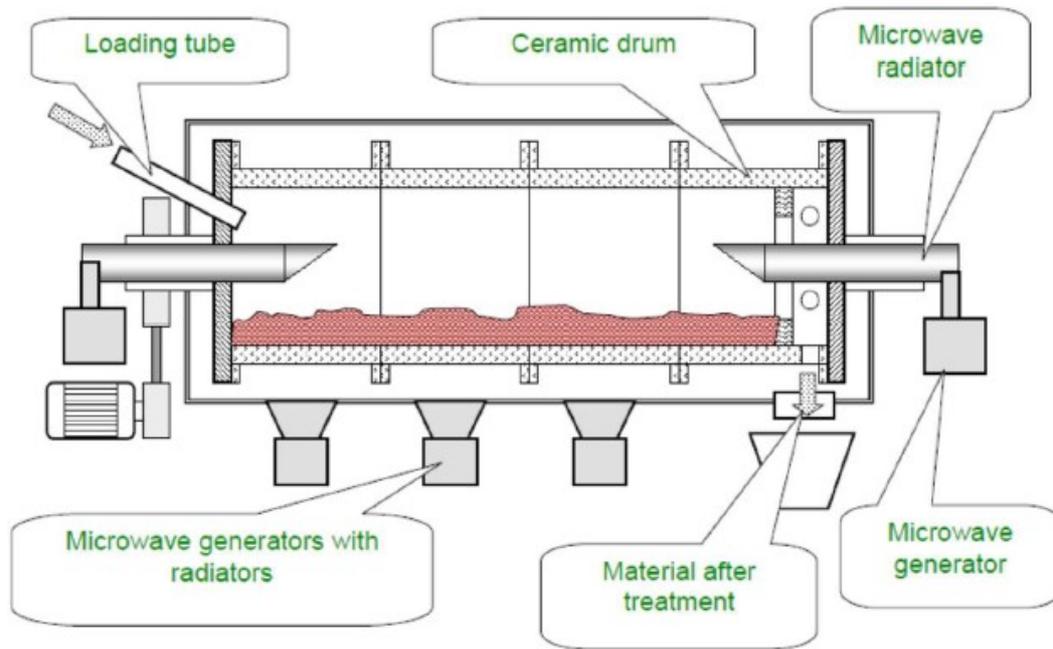


Figure 11 : Schéma de principe du procédé ATON HT

III Discussion :

Pour répondre à la question initiale de ce mémoire, oui les alternatives à l'enfouissement des déchets amiantés existent. L'ensemble des techniques de traitement présentées se distingue par leur capacité à traiter définitivement l'amiante en mettant fin à ses propriétés toxiques. Pour l'ensemble, il s'agit de solutions techniques thermiques ou thermo-chimiques avec pour certaines un produit de traitement valorisable et à fortes valeurs ajoutés. Néanmoins, des points limitatifs persistent et seront abordés dans ce chapitre.

III.1 Point de vue technique et maturité :

Certaines des technologies présentées ont fait leurs preuves et sont déjà capables de traiter des quantités industrielles de déchets amiantés tandis que d'autres sont encore en phase de test.

Tableau 4 : Bilan des technologies présentés [38]

Technologie	procédés	Technique	Valorisation	Avancement
INERTAM	Thermique	Fusion/vitrification	Cofalit	Industriel
SUMITOMO OSAKA CEMENT	Thermochimique	Agent minéralisant / acide	Ciment	Brevet
ARI TECHNOLOGIE	Thermochimique	Agent minéralisant	Faible	Industriel
Microwave- Driven Asbestos Treatment	Thermique	Micro onde		Pilote industriel
ATON HT	Thermochimique	Agent minéralisant	Faible	Pilote industriel
NEO ECO RECYCLING	Thermochimique	Agent acide	Oui	Pilote laboratoire
Carpena Lacout	Thermochimique	Agent acide	Oui	Recherche pilote industriel
VALMIANTE	Thermochimique	Agent acide	Oui	Stade de recherche

Dans le but de comparer la maturité des différentes technologies de traitement présentées, une échelle TRL (technology readiness level) a été mise en place. Il s'agit d'un système de mesure développé par des agences gouvernementales américaines afin d'évaluer le niveau de maturité d'une technologie (39). L'échelle repose sur le principe suivant : lorsqu'une nouvelle technologie est développée elle n'est pas directement applicable. Elle doit tout d'abord passer d'une partie théorique,

être soumise à l'expérimentation, connaître des ajustements et enfin à des tests de plus en plus réaliste. Dans le cadre de ce mémoire, l'échelle TRL des technologies de traitement de l'amiante décrites se dresse ainsi :



Figure 12 : échelle TRL des technologies présentées

L'analyse de cette échelle met en évidence la présence de deux technologies mature et opérationnelle à l'échelle industrielle. Il s'agit du traitement thermique par torche à plasma (Inertam) et du traitement thermochimique par l'utilisation d'un agent minéralisant (ARI Technologie). Dans la phase développement, les technologies ATON HT et Microwave asbestos driven treatment sont en phase de test en environnement réel. Enfin dans le phase émergence, on retrouve les procédés Sumitomo Osaka Cement, VALMIANTE et Neo Eco recycling. Il est intéressant de

noter que pour ces procédés qui sont les moins matures et les plus jeunes technologiquement parlant, la valorisation du produit de traitement des déchets amiantés est l'objectif initial.

Dans le volet thermique, la principale solution d'inertage des déchets amiantés à échelle industrielle (30t/jour) est le traitement thermique par torche à plasma. En dépit de sa capacité à mettre fin à la toxicité de l'amiante en le transformant en un vitrifiat, cette solution est loin d'être privilégiée. Le coût peut en partie expliquer ce choix mais il est loin d'en être l'unique cause.

Concernant les traitements thermochimiques, le procédé le plus avancé (ARI TECHNOLOGIES) se base 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. Ce procédé connaît une forte popularité en Angleterre car les tarifs de stockage en centre d'enfouissement y sont élevés.

Le procédé ATON HT est assez similaire à ARI TECHNOLOGIES dont la mesure qu'il utilise un agent minéralisant. Mais c'est sur le volet thermique que les deux technologies s'individualisent. ARI TECHNOLOGIES utilise un four à foyer rotatif déjà utilisé dans le secteur de la sidérurgie ce qui en fait un procédé maîtrisé et capable de traiter des quantités industrielles de déchets (50t/jour). S'agissant d'ATON HT, l'utilisation d'un champ électromagnétique pour le traitement thermique des déchets est assez unique en son genre et a démontré son potentiel dans le cadre d'un pilote industriel. La faible consommation énergétique et le coût final estimé à 110 €/tonne en font un atout majeur. Mais la capacité de traitement de la future unité de traitement (1t/jour) est loin des quantités pouvant être traité par ARI TECHNOLOGIE (38).

Notons que certains procédés industriels existants, autres que les solutions présentées dans ce mémoire sont capables de traiter les déchets amiantés. Il s'agit des cimenteries et des aciéries. En effet, la température des fours de cimenterie et les durées de traitement sont suffisantes pour détruire la structure fibreuse de l'amiante et les éventuels polluants qui y sont liés. Pour ce qui est des aciéries, il est possible de traiter et de valoriser les pièces métalliques amiantées dans les fours d'aciéries. Néanmoins, ni les cimenteries et aciéries ne sont conçus pour une prise

en charge de déchets amiantés garantissant la sécurité des personnes réalisant les opérations de traitement.

III.2 Produits de valorisation :

Les recherches qui ont accompagnés la réalisation de ce mémoire ont mené au constat suivant : en réalisant cette étude il apparaît que les solutions industriellement disponibles se sont d'abord intéressées à des procédés capables de dénaturer l'amiante puis dans un second temps à la valorisation du produit de cette dénaturation. Cela s'est traduit par un objectif initial qui était d'avoir un produit sans frais d'élimination comme c'est le cas du procédé ARI TECHNOLOGIES mais sans pour autant aller plus loin. Si l'on reprend l'échelle TRL présentés auparavant, les technologies matures ont réfléchi à la valorisation des produits de traitement en dernier lieu, c'est à dire une fois leur procédé opérationnel.

Si on prend le procédé INERTAM pour exemple, le Cofalit, qui est le produit d'inertage de l'amiante a été commercialisé en sous-couche routière à un prix relativement bas qui de 5€ la tonne. Néanmoins plusieurs études présentées dans ce mémoire ont démontré qu'un autre type d'utilisation de ce matériau est possible avec une plus grande valeur ajoutée.

Notons tout de même que pour des procédés plus récents tels que VALAMIANTE, NEO ECO RECYCLING ou CAPENA LACOUT, la valorisation du produit de traitement faisait partie des objectifs initiaux. De ce fait, les produits de dénaturation de l'amiante disposent d'une plus grande valeur ajoutée.

D'autres solutions comme le procédé SUMITOMO OSAKA CEMENT, propose de traiter les déchets amiantés directement dans des fours de cimenteries. Le but étant d'une part de bénéficier de plateformes déjà existante pour dénaturer la structure fibreuse de l'amiante et d'autre part de transformer les déchets amiantés en une matière première pour l'industrie cimentière.

III.3 Cadre réglementaire et responsabilité des déchets :

Tout d'abord, la réglementation encadrant l'amiante est abordée dans deux textes juridiques à savoir le code du travail et le code de l'environnement. Cela permet de répondre aux problématiques inhérentes à chacun des codes mais soulève certaines difficultés dans le cadre d'une approche globale. Par exemple,

concernant le produit issu du traitement d'un déchet amianté, le seuil réglementaire de concentration de 0,1% d'une substance reconnue comme étant cancérogène sert de base juridique pour justifier d'un classement en déchet dangereux au regard de la réglementation du code de l'environnement (38). Néanmoins, le code de la santé et du travail ne fournissent pas de prescription applicable en matière de risques sanitaires pour apprécier les potentialités d'émission de fibres des déchets issus du traitement.

De plus, la réglementation en matières d'émission de fibres se limite à encadrer les opérations de désamiantage. De ce fait, il n'existe pas pour les sites dédiés au traitement des déchets amiantés, des prescriptions contraignantes garantissant un même niveau de protection des personnes y travaillant. Aussi, il est pertinent de noter que même si des technologies assurent que le produit traitement est dépourvu des propriétés toxiques de l'amiante et clament haut et fort que leur technologie mène au « zéro fibre », la mesure de cette performance ne fait pas l'objet d'une prescription réglementaire.

S'agissant enfin de la responsabilité des déchets, les procédés décrits dans ce mémoire permettent de transférer la responsabilité du producteur/détenteur des déchets à l'installation dédiée à leurs traitements. Notons que cela n'est pas le cas des installations de stockage et d'enfouissement où le producteur reste légalement responsable des déchets. Ainsi le risque à long terme inhérent à l'enfouissement et au stockage est un facteur pouvant favoriser le choix des procédés de traitement.

III.4 Point de vue économique et perspectives :

Si l'on raisonne uniquement en termes de coût, il est vrai que la balance penche largement du côté de l'enfouissement. En effet, l'écart de prix est conséquent : 200 euros la tonne pour l'enfouissement contre plus de 1000 euros la tonne pour l'inertage par exemple (40). Cet écart peut être réduit par la valorisation du produit de l'inertage : le Cofalit, mais ce dernier n'est pas encore suffisamment exploité et des études sont en cours pour valider son utilisation comme matériau de stockage de la chaleur. Ainsi une meilleure valorisation du produit de traitement permettrait de réduire le prix.

Notons qu'il est peu probable qu'une solution de traitement des déchets amiantés puisse être commercialisée à un coût inférieur à celui du stockage en

installation dédiée mais la solution ARI technologies affirme que des prix similaires sont envisageables. Cela est aussi le cas pour la solution ATON HT dont la faible consommation énergétique permet d'avancer un coût de traitement de 110€/tonne.

L'enjeu financier de ces solutions n'est pas le principal obstacle à leur démocratisation. Le fait est que le coût de traitement des déchets amiantés représente une faible part du bilan économique global d'une opération de désamiantage et c'est à ce niveau que des économies peuvent être réalisées. Les sociétés spécialisées dans le désamiantage en sont conscientes et dirigent leur recherche et développement vers les procédés de désamiantage par rapport aux solutions de traitement. Il s'agit de mettre en place des procédés de désamiantage capables de séparer efficacement les matériaux amiantés de leur support en réduisant au maximum l'émission de fibres.

Cette séparation représente une voie d'amélioration majeure. Si l'on observe les flux de déchets produits suite au désamiantage, il s'agit en grande partie d'associations d'amiante et d'autres matériaux (plâtre, métaux...), ce qui caractérisent les difficultés de désassemblage. Cela est dû à deux facteurs :

- D'une part, la séparation de l'amiante des matériaux qui en sont dépourvus est compliquée (flocage sur une paroi en plâtre, calorifugeage dans l'enveloppe interne d'un four etc.).
- D'autre part, la séparation de l'amiante des matériaux qui en sont dépourvus entraînerait une importante libération de fibres ce qui aurait un impact sur l'environnement de travail (sécurité des opérateurs et empoussièrément).

Ces enjeux techniques et sécuritaires (santé des opérateurs) rencontrés lors de la séparation des matériaux remettent en cause dans certains cas l'intérêt du désamiantage d'éléments constitutifs d'équipements par rapport à leur traitement direct comme déchet amianté. De ce fait, certains équipements difficiles à désamianter sont entièrement dirigés vers des centres d'enfouissement. Le volume des déchets est alors plus conséquent ce qui se répercute sur la facture de traitement *via* la solution d'inertage par exemple. De plus, ni cette solution ni aucune autre n'est en mesure de traiter des équipements de plusieurs tonnes (un four industriel par exemple) sous prétexte qu'ils contiennent de l'amiante. De ce fait il est pertinent de mettre en place deux filières de désamiantage distinctes :

- L'une destiné aux ouvrages tertiaires.
- L'une destiné aux ouvrages industriels incluant des opérations de déconstruction des équipements contenant de l'amiante.

Par conséquent, l'évolution du marché de la gestion des déchets amiantés, qui rappelle les « déchets-historiques », nécessitent de l'innovation dans celui du désamiantage. Cela se fera par l'amélioration du processus de repérage et le développement de techniques permettant d'isoler avec précision les matériaux contenant de l'amiante. Il apparaît donc pertinent de mettre en place deux filières de désamiantage distincte :

Aussi, un engagement des pouvoirs publics est nécessaire pour forcer le marché à évoluer dans le sens des solutions de dénaturation de l'amiante. Le pas a été emboîté en France par la création d'une commission d'évaluation des innovations techniques liées à l'amiante dans le bâtiment (41). Cette commission aura pour objectif d'améliorer la diffusion et de garantir l'efficacité de techniques liées à :

- La détection et la mesure de l'amiante => Repérage
- La gestion des opérations en chantiers amiantés => Désamiantage.
- Le traitement des déchets.
- La réduction des coûts d'interventions à sécurité constante.

Cette démarche rejoint la politique menée au Japon pour encourager la recherche dans le domaine de l'amiante et a conduit le gouvernement à la mise en place d'une certification des techniques performantes. Mais à terme, il faudra aller plus loin pour mettre fin aux stockages et à l'enfouissement des déchets amiantés. Pour y arriver, il sera nécessaire d'encourager les filières de traitement par l'intermédiaire de subventions comme cela fut le cas par exemple pour les projets de rénovation thermique. Cela permettrait de partager le prix du traitement entre le producteur des déchets et l'état. Néanmoins cette solution poserait deux problématiques. La première concerne les déchets enfouis et stockés qui demeurent sous la responsabilité de leur producteur et dont il est difficile d'estimer aujourd'hui la quantité. La deuxième concerne la capacité des centres de traitement à absorber les quantités de déchets générés.

Conclusion :

L'amiante a été largement utilisé du fait de ces propriétés physico-chimiques. Le secteur industriel et celui du BTP y ont trouvés une réponse à leurs problématiques de résistance à la chaleur et d'étanchéité. Néanmoins l'émergence de multiples études scientifiques mettant en évidence les effets toxiques de l'amiante ont menés les autorités à l'interdiction de ce matériau.

Si aujourd'hui l'amiante est interdit d'utilisation, il demeure présent dans les bâtiments et équipements construits/fabriqués avant le 1^{er} Juillet 1997 et c'est dans ce contexte qu'un travail de repérage de ce matériau a été imposé par la loi. Aussi, toutes les opérations menant à entrer en contact avec ce matériau (désamiantage, démolition, travaux etc.) sont susceptibles de générer des déchets amiantés dont la toxicité est similaire à celles démontrés par les études sur le matériau initial.

Ces déchets sont principalement acheminés vers des centres de stockage et d'enfouissement. Cette démarche ne permet pas d'éliminer le risque inhérent à ce déchet et posent la question de leur gestion à long terme et la capacité de ces sites à absorber les quantités de déchets générés.

La synthèse bibliographique réalisée dans le cadre de ce mémoire a permis de mettre en évidence que des alternatives à l'enfouissement existent. Ces dernières permettent de mettre fin à la toxicité de l'amiante et génèrent un produit de traitement valorisable dans les secteurs énergétiques, cimentier et aussi dans la fabrication de composés siliciques. Notons tout de même que l'ensemble des technologies présentées n'est pas capable de traiter des quantités industrielles de déchets amiantés.

Ces alternatives reposent sur des techniques de traitement thermique et thermochimique. Les premières utilisent un système à haute température (et hautement énergétique) pour traiter l'amiante par fusion. Les deuxièmes quant à elles utilisent un traitement chimique préalable au traitement thermique. Cela permet de réduire la température nécessaire pour inerte l'amiante et par conséquent réduire la facture énergétique du procédé.

Enfin, cette étude a démontré que le coût de ces solutions n'était pas le principal inconvénient à leur démocratisation. En effet, ce dernier ne représente qu'une faible part du bilan économique d'une opération de désamiantage et c'est là que des évolutions sont nécessaires.

Bibliographie :

1. DUGAN Emily. Asbestos : a shameful legacy. The Independent [en ligne]. Novembre 2009, [consulté le 15/05/2017]. Disponibilité sur internet : <http://www.independent.co.uk/news/uk/home-news/asbestos-a-shameful-legacy-1825554.html>).
2. DERIOT Gérard, GODEFROY Jean (mission commune d'information). L'amiante: comprendre, mieux réparer, en tirer des leçons pour l'avenir. Octobre 2005, [consulté le 15/05/2017]. Disponibilité sur internet : <https://www.senat.fr/rap/r05-037-1/r05-037-1.html>
3. INRS, « L'amiante ce qu'il faut retenir », sur le site de l'INRS [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : <http://www.inrs.fr/risques/amiante/ce-qu-il-faut-retenir.html>
4. Senat, « Amiante : les prévisions de dépenses à plus long terme », sur le site du sénat [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : <https://www.senat.fr/rap/r05-037-1/r05-037-155.html>
5. INSERM, « Amiante : Rappels sur la nature physico-chimique de fibres d'amiante », sur le site de l'INSERM [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : <http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/203/?sequence=6>
6. Senat, « le désamiantage : une réglementation stricte et couteuse », sur le site du sénat [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : <https://www.senat.fr/rap/r05-037-1/r05-037-188.html>
7. ORESKES N, CONWAY E. Merchant of doubts. Bloomsbury Press. Julliet 2012
8. INSERM, « L'amiante : caractéristique physico-chimiques, utilisation, métrologie, circonstances et niveaux d'exposition, réglementation », sur le site de l'INSERM [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : http://lara.inist.fr/bitstream/handle/2332/1373/INSERM_amiante3.pdf?sequence=3
9. CARSAT, « Assurer et prévenir les risques professionnels », Mars 201, [consulté le 15/05/2017]. Disponibilité sur internet : <http://www.carsat-bfc.fr/images/assurer-et-prevenir-les-risques-professionnels/documents/guide%20amiante%20%20version%20dfinitive%203.pdf>
10. Robert L. Virta (US department of the interior, US geological survey). Worldwide Asbestos supply and consumption trends. 2006 [consulté le

- 15/05/2017]. Disponibilité sur internet :
<https://pubs.usgs.gov/circ/2006/1298/c1298.pdf>
11. Daniel M. FLANAGAN (US geological survey). Asbestos production and use. Janvier 2016 [consulté le 15/05/2017]. Disponibilité sur internet :
<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/asbestos/mcs-2016-asbes.pdf>
12. Arthur L. Frank, T.K. Joshi. The global spread of asbestos. ANN GLOB HEALTH. 2014 Jul-Aug ; 80 (4) : 257-262 :
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214999614003191>
13. Rand corporation, « Asbestos litigation » sur le site Rand corporation [en ligne] consulté le 15/05/2017 :
<http://www.rand.org/news/press/2005/05/10.html>
14. (Deng et al, 2009; Wang et al., 2013; Ndlovu et al., 2013)
15. IARC, « IARC monographs : Asbestos », sur le site de l'IARC [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet :
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/suppl7/Suppl7-20.pdf>.
16. Cancer-environnement, « L'amiante dans le monde' », sur le site cancer-environnement [en ligne], consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet :
http://www.cancer-environnement.fr/Portals/0/Documents%20PDF/Rapport/Autre/HESA/2005_L%E2%80%99amiante%20dans%20le%20monde.pdf
17. Gouvernement du Québec ministère des ressources naturelles : « les articles scientifiques sur l'amiante ». Consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet :
<https://www.mern.gouv.qc.ca/publications/ministere/politique/amiante.pdf>
18. INRS, « Amiante : les effets sur la santé », sur le site de l'INRS [en ligne], consulté le 18/05/2017. Disponibilité sur internet :
<http://www.inrs.fr/risques/amiante/effets-sante.html>
19. Record, « Recherche coopérative sur les déchets et l'environnement », sur le site de Record [en ligne], Disponibilité sur internet : <https://www.record-net.org>
20. Jinhui Li, Qingyin Dong, Keli Yu, Lili Liu. Asbestos and asbestos waste management in the Asian-Pacific region: trends, challenges and solutions. J CLEAN PROD. 2014 Jun 18; 81 : 226-258
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614006106>
21. Ministry of the environment of Japan, "Summary of contemeasures againt asbestos in Japan" [en ligne], consulté le 25/02/2017 :
https://www.env.go.jp/en/air/asbestos/summary_caa.pdf

22. AMORCE, « Les installations de stockage des déchets » sur le site des Association de collectivités, gestion des déchets, réseaux de chaleurs, gestion locale de l'énergie [en ligne], consulté le 18/05/2017. Disponibilité sur internet : http://www.amorce.asso.fr/media/filer_public/2d/c0/2dc04308-1855-4404-9a6e-18b1cc4bd1d1/dt22.pdf
23. E. Gomez, D. Amutha Rani, C.R. Cheeseman, D. Deegan, M. Wise, A.R. Boccaccini. Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. J HAZARD MATER. 2008 Apr 11; 161(2-3) :614-626. Disponibilité sur internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408005426>
24. INERTAM, « Le procédé Inertam : valorisation des déchets d'amiante », sur le site Inertam [en ligne] consulté le 16/05/2017 : <http://www.inertam.com/La-societe-Inertam/le-procede-inertam-valorisation-amiante-et-dechets.html>
25. Nicolas CALVET, Antoine MEFFRE, Régis OLIVÈS, Emmanuel GUILLOT, Xavier PY, Catherine BESSADA, Patrick ECHEGUT. Matériau de stockage thermique par chaleur sensible pour centrales électro-solaires testé sous flux solaire concentré. Procédés Matériaux et Energies Solaires-CNRS.
26. A. Faik, S. Guillot, J. Lambert, E. Véron, S. Ory, C. Bessada, P. Echegut, X. Py. Thermal storage material from inertized wastes: Evolution of structural and radiative properties with temperature. SOL ENERGY. 2012 Jan, 86(1):139-146. Disponibilité sur internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11003409?np=y&npKey=29c9f9de71948bf6df34e30566d1f238c64afa9b89bf7b2ad1106c0945e056a1>
27. Alessandro F. Gualtieri, Linda Veratti, Antonella Tucci, Leonardo Esposito. Recycling of the product of thermal inertization of cement-asbestos in geopolymers. CONSTR BUILD MATER. 2012 Jun, 31:47-51.
28. Viani A, [Gualtieri AF](#). Recycling the product of thermal transformation of cement-asbestos for the preparation of calcium sulfoaluminate clinker. J Hazard Mater. 2013 Sep 15;260:813-8. Disponible sur internet : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23856311>
29. Martin Biggs. Technology Assessment : Asbestos destruction using ARI's Thermochemical Conversion Technologie (TCCT)” – 9/11/2004
30. Roger B. Ek. Mineralogical conversion of asbestos waste. US5096692 A [en ligne]. 17/03/1992. Consulté le 15/04/2017. Disponible sur internet : <https://www.google.com/patents/US5096692>
31. 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
32. ADEME, "perspective de valorisation des déchets d'amiante en zeolithe, par des processus d'altération controlés" [en ligne]. Consulté le 15/05/2017. Disponibilité sur internet : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/valmiante-synthese-publique.pdf>
33. SUMITOMO OSAKA CEMENT. Method of treating asbestos containing waste material. US20100130806 A1 [en ligne]. 27/05/2010. Consulté le 30/08/2017. Disponible sur : <http://www.google.sr/patents/US20100130806>
34. Denis G, Delmas M. Method for treating an asbestos solid. WO/2009/141565 [en ligne]. 01/06/2010. Consulté le 20/08/2017. Disponibilité sur internet : <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2009141565>
35. Carpena J, Lacout JL. Traitement acide sous faibles températures et pression d'un déchet contenant de l'amiante. CA2722779A1 [en ligne]. 19/11/2009. Consulté le 23/08/2017. Disponibilité sur internet : <https://encrypted.google.com/patents/CA2722779A1?cl=fr>
36. Horikoshi S, [Sumi T](#), [Ito S](#), [Dillert R](#), [Kashimura K](#), [Yoshikawa N](#), [Sato M](#), [Shinohara N](#). Microwave-driven asbestos treatment and its scale-up for use after natural disasters. Environ Sci Technol. 2014 Jun 17; 48(12): 6882-90.
37. Aton-HT. Method and an apparatus for conversion of materials including asbestos. US20080207979 A1 [en ligne] 28/08/2008. Consulté le 15/08/2017. Disponible sur : <http://www.google.sr/patents/US20080207979>
38. Recherche coopérative sur les déchets et l'environnement, « Gestion de la fin de vie des matériaux à base d'amiante et autres matériaux fibreux » [Enligne], publié en Mai 2016. Consulté le 05/04/2017. Disponibilité sur internet : http://www.record-net.org/storage/etudes/14-0333-1A/Synthse/Synth_record14-033381A.pdf
39. RESCOLL, « L'échelle TRL ou le niveau de maturité technologique d'un projet » [En ligne]. Sur le site RESCOLL, société privée de prestations de service technologique. Consulté le 16/09/2017. Disponibilité en ligne : https://rescoll.fr/lechelle-trl-ou-le-niveau-de-maturite-technologique-dun-projet_trashed/
40. Sénat, « Amiante : des enjeux toujours actuels, relever le défi du désamiantage » [En ligne]. Consulté le 02/03/2017. Disponibilité en ligne : <http://www.senat.fr/rap/r13-668/r13-6688.html>

41. Ministère du logement et de l'habitat durable, « Installation de la commission nationale d'évaluation des innovations dans le domaine de l'amiante dans le bâtiment » [Enligne]. Publié le 27/01/2017. Consulté le 05/04/2017. Disponibilité en ligne : http://www.logement.gouv.fr/IMG/pdf/2017_01_27_installation_commission_nationale_d_evaluation_des_innovations_dans_le_domaine_de_l_amiante.pdf

Amiante : quelles sont les alternatives à l'enfouissement et est-ce que la valorisation est possible ?

Mots-clés : amiante, déchets amiantés, toxicité de l'amiante et de ces déchets, désamiantage, enfouissement, procédés thermiques, procédés thermochimiques, valorisation des déchets amiantés, maturité technologique.

Asbestos: is there an alternative to asbestos landfill deposit and is it possible re use asbestos waste

Keywords: asbestos, asbestos waste, asbestos toxicity, asbestos removal, landfill, thermal process, thermochemical process, re use asbestos waste, technologically mature.