



Évaluation de la toxicité de l'antigorite

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juin 2014

Édition scientifique





Évaluation de la toxicité de l'antigorite

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juin 2014

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 25 juin 2014

AVIS **de l'Agence nationale de sécurité sanitaire** **de l'alimentation, de l'environnement et du travail**

relatif à l'évaluation de la toxicité de l'antigorite

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L. 1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

L'Anses a été saisie conjointement le 07/08/2012 par la Direction générale de la prévention des risques, la Direction générale de la santé et la Direction générale du travail à la demande de la Direction de l'industrie des mines et de l'énergie de la Nouvelle-Calédonie pour la réalisation de l'expertise suivante : Évaluation de la toxicité de l'antigorite.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Contexte de la saisine

L'amiante est un terme commercial générique relatif à six fibres minérales¹ dites asbestiformes², à savoir le chrysotile qui est une serpentine et l'amosite, la crocidolite, l'actinolite-amiante, l'anthophyllite-amiante et la trémolite-amiante qui sont des amphiboles. Le groupe des serpentines comprend également d'autres minéraux dont l'antigorite et la lizardite.

La cancérogénicité pleurale et bronchique des 6 fibres minérales mentionnées ci-dessus a été confirmée dès 1977 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). En 2012, il a également indiqué que les preuves étaient suffisantes pour considérer l'amiante comme un facteur de risque avéré des cancers du larynx et de l'ovaire.

Ces six fibres d'amiante sont classées par la réglementation européenne et française comme des agents cancérogènes avérés pour l'Homme. En Europe et en France, les réglementations relatives à la protection des travailleurs vis-à-vis des risques liés à une exposition à l'amiante s'appliquent uniquement aux six fibres minérales asbestiformes précédemment citées. Ainsi, l'antigorite et

¹ L'Organisation mondiale de la santé (OMS) définit une fibre comme une particule allongée à bords parallèles ayant un rapport longueur sur diamètre supérieur à 3, une longueur supérieure ou égale à 5 µm et un diamètre inférieur à 3 µm.

² Le terme asbestiforme fait référence à une morphologie provenant d'une cristallisation naturelle et unidimensionnelle d'un minéral donnant des fibres ayant l'apparence de cheveux.

d'autres minéraux du même groupe comme la lizardite ne sont pas prises en compte dans le cadre de la réglementation applicable à l'amiante.

Les données géologiques et minérales particulières de Nouvelle-Calédonie relatives à la problématique des occurrences naturelles de ces fibres minérales asbestiformes ou « amiante » ont conduit les autorités de ce territoire d'Outre-mer à adopter en 2010 une « délibération relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics ». Cette législation a inclus l'antigorite dans la liste des fibres considérées comme de l'amiante.

Objet de la saisine

La saisine demandait :

- de réaliser une revue et une analyse critique de la littérature scientifique relative à la toxicité de l'antigorite ;
- d'examiner si la littérature scientifique disponible permet de différencier les effets sur la santé de l'antigorite selon qu'elle est sous forme fibreuse, non fibreuse ou de fragments de clivage.

Les résultats des travaux d'expertise devraient permettre de juger de l'opportunité de préciser le champ d'application de la réglementation en Nouvelle-Calédonie, dans le but d'orienter les moyens de prévention vers les situations qui le nécessitent prioritairement.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

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

L'expertise a été conduite par l'Anses et des experts rapporteurs couvrant les domaines de compétence de la géologie, la minéralogie, la toxicologie et l'épidémiologie.

Les travaux d'expertise ont été régulièrement suivis par le Comité d'Experts Spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens », qui a été mobilisé pour répondre à cette saisine. Le CES « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » a été également sollicité pour apporter sa contribution dans l'expertise, en particulier en ce qui concerne l'appréciation des données de toxicité.

Les experts rapporteurs ont passé en revue l'ensemble des données disponibles relatives à l'antigorite, et en particulier à sa toxicité. En particulier, ils ont procédé à l'examen des données transmises par la Direction des affaires sociales et sanitaires et par la Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie. Ils ont également recensé et analysé l'ensemble des études épidémiologiques et expérimentales disponibles relatives à l'antigorite.

Étant donné le très faible nombre d'études spécifiques à l'antigorite, les experts ont également procédé à l'examen des données de toxicité relatives aux fibres minérales allongées de la famille des silicates, dont fait partie l'antigorite, afin d'identifier des éléments complémentaires utiles à l'expertise.

Les travaux d'expertise ont été présentés au CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques entre le 7 février 2013 et le 15 mai 2014. Ils ont été adoptés par le CES lors de sa réunion du 15 mai 2014.

Les conclusions et recommandations du présent avis se fondent sur ce rapport et sur la Note d'Expertise Collective (NEC) adoptée par le CES le 15 mai 2014.

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

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE, CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DU CES

■ Analyse

○ Minéralogie de l'antigorite

L'antigorite appartient au groupe des serpentines, et à la sous classe minéralogique des phyllosilicates, caractérisés par une structure cristallographique en feuillets (silicates lamellaires). L'antigorite est ainsi un silicate de la même classe minéralogique que le chrysotile et la lizardite avec lesquels elle partage la même composition chimique générique mais dont elle se différencie par sa structure tridimensionnelle. Ces trois minéraux se distinguent également par leurs réponses respectives aux contraintes du réseau cristallin. De façon générale, l'antigorite se présente sous une forme plutôt prismatique mais plusieurs auteurs ont signalé l'existence de formes fibreuses d'antigorite.

La distinction entre les trois minéraux les plus abondants des serpentines, à savoir le chrysotile, l'antigorite et la lizardite, et la détermination de leurs caractéristiques dimensionnelles sont obtenues de manière univoque par l'utilisation de deux méthodes complémentaires, la spectrométrie Raman à transformée de Fourier et la microscopie électronique à transmission couplée à un analyseur élémentaire.

○ Géologie de l'antigorite en Nouvelle-Calédonie

En Nouvelle-Calédonie, des occurrences à antigorite sont connues dans trois unités géologiques, celles du Diahot, de la Boghen et de la Nappe des péridotites. Cependant, les études de contexte géologique, de caractérisation minéralogique et d'occurrences des roches renfermant des fibres minérales asbestiformes, dites amiantifères, ont été majoritairement ciblées sur la Nappe des péridotites, en raison de la présence de travaux d'extraction minière. La Nappe des péridotites couvre à elle seule un tiers de la surface de la Grande Terre.

Dans la Nappe des péridotites, les occurrences à antigorite sont connues dans presque tous les massifs pouvant être exploités dans le cadre d'activités minières, avec des fréquences très variables d'un massif à l'autre ou même d'un secteur à l'autre d'un même massif. Ces occurrences correspondent à des veines d'épaisseur centimétrique à décimétrique décrites sous la dénomination de « plan à antigorite » ou de « plan à cristallisations fibro-lamellaires ». Les analyses réalisées à partir de ces structures ont montré d'une part, que du chrysotile est associé d'une manière très étroite et presque systématique aux veines d'antigorite, et d'autre part que des assemblages trémolite-amiante / antigorite existent.

En outre, soumises à l'altération naturelle, ces veines à antigorite se désagrègent en un matériau blanchâtre, constitué par un mélange de fibres très fines et de fragments rigides correspondant à des particules hétérométriques d'antigorite encore appelés « amas fibro-lamellaires ». Les données analytiques obtenues à partir de ces structures à antigorite très altérées et, pour partie désagrégées, montrent que la fraction la plus fine des particules minérales observées possède des caractéristiques morphométriques qui sont celles des fibres au sens de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Il y a donc lieu de distinguer au sein de l'antigorite, des formes fibreuses et non fibreuses, qui sont souvent mélangées.

○ Données toxicologiques et épidémiologiques spécifiques à l'antigorite

Les études expérimentales relatives à la toxicité de l'antigorite, réalisées aussi bien dans des conditions *in vitro* qu'*in vivo*, sont rares. Ainsi, seules 7 études ont été recensées :

- Les quatre³ premières sont des études antérieures à 1991 et portent sur les effets de l'antigorite non fibreuse sur des cultures cellulaires. L'antigorite y a été utilisée comme

³ Woodworth CD, Mossman BT, Craighead JE; 1983. Induction of squamous metaplasia in organ cultures of hamster trachea by naturally occurring and synthetic fibers. Cancer Res. 43: 4906-12.

« témoin minéral non fibreux » en comparaison avec deux minéraux fibreux classés amiante : le chrysotile et la crocidolite. Les résultats montrent une activité *in vitro* faible sinon nulle de l'antigorite non fibreuse, en tant qu'agent promoteur de tumeurs ou plus globalement favorisant la prolifération cellulaire.

- Deux autres études⁴ plus récentes (2007 et 2010) portent sur les effets de l'antigorite fibreuse sur des cultures cellulaires. Dans ces études, les auteurs ont comparé l'activité cytotoxique de cette forme d'antigorite à celle obtenue avec des cellules témoins non exposées d'une part, et avec des cellules exposées à la crocidolite d'autre part. Elles montrent que l'antigorite fibreuse est cytotoxique à forte dose, cet effet pouvant correspondre soit à un effet de surcharge soit à un « effet fibre » non spécifique de cette espèce minérale.
- La seule étude⁵ *in vivo* date de 1993. Elle utilise, en injections intrapéritonéales chez les rongeurs, d'extraits minéraux à fortes doses, dont certains contiennent de l'antigorite, sans précision de forme, mais aussi d'autres serpentines et du quartz. Elle est de ce fait difficilement interprétable.

Les données épidémiologiques disponibles sont en faveur d'une origine principalement environnementale de l'excès de cas de mésothéliomes, observé en Nouvelle-Calédonie. Une seule étude épidémiologique⁶, relative à l'antigorite, a été retrouvée dans la littérature. Cette étude, de type écologique, avait comme objectif de tester les éventuelles relations entre la survenue de mésothéliomes au sein des populations vivant en Nouvelle-Calédonie et différents facteurs de risque environnementaux. Cette étude met en avant la présence de serpentines comme facteur de risque, sans pouvoir toutefois individualiser l'antigorite, elle-même, comme facteur de risque du mésothéliome.

- **Données toxicologiques relatives aux fibres minérales allongées de la famille des silicates**

Une revue des données de la littérature sur la toxicité des autres fibres minérales de la famille des silicates non classées « amiante », appelées d'une façon générique « particules minérales allongées », a permis de faire la synthèse sur les différents facteurs influençant leur toxicité. Les facteurs étudiés étaient aussi bien dimensionnels que physico-chimiques, tels que : la longueur, le diamètre, le rapport d'allongement, la surface, la solubilité, le potentiel de dépôt et de clairance, la biopersistance et la réactivité de surface. Il apparaît ainsi que la part respective de ces facteurs est encore loin d'être élucidée. De même, la morphologie asbestiforme de ces particules minérales

Marsh JP, Mossman BT; 1988. Mechanisms of induction of ornithine decarboxylase activity in tracheal epithelial cells by asbestiform minerals. *Cancer Res.* 48: 709–714.

Sesko A, Mossman B; 1989. Sensitivity of hamster tracheal epithelial cells to asbestiform minerals modulated by serum and by transforming growth factor beta 1. *Cancer Res.* 49: 2743–2749.

Mossman BT, Sesko AM; 1990. In vitro assays to predict the pathogenicity of mineral fibers. *Toxicology.* 60:53-61.

⁴ Cardile V, Lombardo L, Belluso E et al; 2007. Fluoro-edenite fibers induce expression of Hsp70 and inflammatory response. *Int J Environ Res Public Health.* 4:195-202.

Pugnali A, Giantomassi F, Lucarini, G, Capella S, Belmonte MM, Orciani M, et Belluso E; 2010. Effects of asbestiform antigorite on human alveolar epithelial A549 cells: A morphological and immunohistochemical study. *Acta Histochemica.* 112: 133-146.

⁵ Wozniak H, Wiecek E, Stetkiewicz J, Wyszynska K; 1993. Experimental carcinogenicity and mutagenicity of non-asbestos natural fibres. *Pol J Occup Med Environ Health;* 6 (1): 55-60.

⁶ Baumann F, Maurizot P, Mangeas M, Ambrosi JP, Douwes J, et Robineau B; 2011. Pleural mesothelioma in new Caledonia: Associations with environmental risk factors. *Environ Health Perspect;* 119: 695-700.

allongées n'a pas été retenue comme critère discriminant de toxicité car elle ne fait pas l'objet d'un consensus scientifique.

■ **Conclusions de l'expertise collective**

- Les données géologiques et minéralogiques de Nouvelle-Calédonie, actuellement disponibles, montrent que d'une part, le chrysotile est associé de manière très étroite et presque systématique à l'antigorite, et que d'autre part des assemblages à trémolite-amiante / antigorite existent.
- Les données existantes de toxicité spécifique à l'antigorite sont très insuffisantes et ne permettent ni d'affirmer ni d'infirmer son potentiel toxique, qu'elle soit sous forme fibreuse ou non fibreuse.
- Les données sur les effets toxiques des particules minérales allongées, dont font partie les formes fibreuses d'antigorite, suggèrent le rôle de différents paramètres comme la biopersistance, la réactivité de surface ou le critère dimensionnel. Toutefois en l'absence d'évaluation de ces paramètres pour l'antigorite, il n'est pas possible de conclure sur une éventuelle toxicité de l'antigorite fibreuse.
- La seule étude épidémiologique relative à l'antigorite ne permet pas de conclure sur l'effet propre de l'antigorite.

Aussi, le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime qu'il n'est pas possible de statuer sur la contribution propre des différentes formes de l'antigorite dans la survenue du mésothéliome ou d'autres pathologies.

■ **Recommandations du CES**

- En l'état actuel des connaissances et concernant la situation particulière des expositions en Nouvelle-Calédonie, le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime qu'il faut considérer les occurrences et les affleurements à antigorite, quelle que soit la forme de celle-ci, comme des situations comportant de manière presque systématique, une exposition à des fibres d'amiante.
- Le CES recommande de traiter ces situations comme les autres expositions aux fibres minérales asbestiformes dites « amiante » et d'appliquer strictement les mêmes mesures de prévention.
- Le CES recommande d'examiner les possibilités de faire une campagne de reconnaissance plus fine des occurrences, notamment de l'antigorite, du chrysotile et de la trémolite, en utilisant les techniques les plus récentes d'identification des fibres minérales. Cette actualisation plus fine de la cartographie pourrait éventuellement permettre de hiérarchiser les différentes zones de danger en fonction de la nature des fibres présentes et ainsi de mieux cibler les campagnes de métrologie et de prévention à mettre en œuvre.
- Dans le cas où de l'antigorite fibreuse non liée à des fibres d'amiante serait retrouvée dans certaines zones, il faudra réaliser des études de toxicité de cette forme d'antigorite conformes aux bonnes pratiques actuellement recommandées.
- Au delà de la problématique propre à l'antigorite en Nouvelle-Calédonie, le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime souhaitable de reconsidérer l'approche actuelle des particules minérales allongées et plus précisément des silicates fibreux. Dans ce cadre, la possibilité offerte par les nanotechnologies de produire des fibres de composition et de dimensions maîtrisées peut permettre le développement de nouvelles études de toxicité expérimentale assurant une meilleure comparabilité et reproductibilité des résultats.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail adopte et reprend à son compte le rapport, les conclusions et les recommandations de l'expertise collective validés par le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

Au delà de la problématique propre à l'antigorite en Nouvelle-Calédonie, il est souhaitable de reconsidérer l'approche actuelle des particules minérales (et plus précisément des silicates fibreux), qui est actuellement basée sur la dénomination commerciale de l'amiante, et qui ne rend aucunement compte à elle seule du champ des particules potentiellement cancérigènes.

Marc MORTUREUX

MOTS-CLÉS

Antigorite, amiante, fibre minérale, mésothéliome, cancer, Nouvelle-Calédonie

Évaluation de la toxicité de l'antigorite

Saisine Antigorite « n° 2012-SA-0199 »

RAPPORT d'expertise collective

**Comité d'experts spécialisé
« Évaluation des risques liés aux milieux aériens »**

Mai 2014

Mots clés

Antigorite, amiante, fibre minérale, mésothéliome, cancer, Nouvelle-Calédonie

Présentation des intervenants

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

RAPPORTEURS

M. Jean-Paul AMBROSI – Chercheur au CNRS - Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (CEREGE) — Dr. en Géologie Appliquée et Dr. en Géochimie de la Surface.

Mme Anne CHEVALIER – Épidémiologiste – Retraitée de l'Institut de Veille Sanitaire.

M. Michel GIROUX – Retraité – Toxicologue. (Décédé en février 2014)

M. Didier LAHONDÈRE – Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) ; Direction des Géoressources – Docteur en Géologie.

M. Fabrice MICHIELS – Service de santé des armées – Médecin du travail - Toxicologue.

NB : Les rapporteurs souhaitent rendre hommage à leur collègue Monsieur Michel Giroux qui, par ses connaissances, ses compétences en toxicologie, et sa convivialité, a contribué activement à la réalisation de ce travail.

COMITÉS D'EXPERTS SPÉCIALISÉS

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

- CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » – 15 mai 2014

Président

M. Christophe PARIS – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Lorraine EA7298 INGRES, – Centre hospitalier universitaire de Nancy). Spécialités : épidémiologie des risques professionnels, pathologies professionnelles.

Vice-présidente

Mme Séverine KIRCHNER – Directrice adjointe de la Direction santé confort (Centre scientifique et technique du bâtiment), coordinatrice de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur – Spécialités : chimie et pollution de l'atmosphère, air intérieur, expologie.

Membres

M. Gille AYMOZ – Chef de service qualité de l'air (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) - Spécialités : physico-chimie de l'atmosphère, rejets atmosphériques.

Mme Armelle BAEZA – Professeur des universités (Université Paris Diderot) – Spécialité : toxicologie.

M. Claude BEAUBESTRE – Chef de département (Laboratoire d'hygiène de la ville de Paris) - Spécialités : pollution de l'air intérieur, microbiologie.

M. Olivier BLANCHARD – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : évaluation des risques sanitaires, pollution atmosphérique, qualité de l'air intérieur.

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique) – Spécialités : toxicologie, évaluation des risques sanitaires.

M. Patrick BROCHARD – Professeur des universités, praticien hospitalier (Université Bordeaux II – Centre hospitalier universitaire de Bordeaux) – Spécialités : médecine du travail, évaluation des risques sanitaires, agents polluants.

M. Denis CHARPIN – Professeur des universités, praticien hospitalier (Aix Marseille Université) – Spécialités : médecine, agents polluants et allergènes, épidémiologie des risques liés à l'environnement.

M. Jean-Dominique DEWITTE - Professeur des universités, praticien hospitalier (Université de Brest) – Spécialités : Santé travail, pneumologie.

Mme Emilie FREALLE – Praticien hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Lille) – Spécialités : Ecologie microbienne de l'air, microbiologie analytique, évaluation et prévention du risque microbiologique, surveillance de l'environnement intérieur.

M. Philippe GLORENNEC – Enseignant chercheur (Ecole des hautes études en santé publique – Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail, UMR Inserm 1085) – Spécialités : expologie, évaluation des risques sanitaires.

Mme Muriel ISMERT – Responsable unité impact sanitaire et exposition (Institut national de l'environnement industriel et des risques) – Spécialités : écotoxicologie, évaluation des risques sanitaires, qualité de l'air intérieur.

M. Eddy LANGLOIS – Ingénieur, responsable de laboratoire (Institut national de recherche et de sécurité) – Spécialités : métrologie des polluants, air des lieux de travail (santé travail), surveillance et méthodes d'analyse.

Mme Danièle LUCE – Directrice de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Spécialités : Epidémiologie, santé travail.

Mme Christelle MONTEIL – Enseignant-chercheur (Université de Rouen) – Spécialités : toxicologie.

Mme Anne OPPLIGER – Chef de projets (Institut universitaire romand de santé au travail) – Spécialités : Santé travail, bioaérosols.

M. Loïc PAILLAT – Ingénieur, responsable technique (Laboratoire central de la préfecture de police) – Spécialités : métrologie des polluants, air intérieur, air ambiant et air des lieux de travail.

Mme Mathilde PASCAL – Chargée de projets (Institut de veille sanitaire) – Spécialités : épidémiologie, santé environnement, air et climat.

M. Emmanuel RIVIERE – Directeur adjoint (Association pour la surveillance et l'étude de la pollution atmosphérique en Alsace) – Spécialités : Méthode d'analyse et de surveillance, modélisation des émissions, évaluation de l'exposition.

Mme Sandrine ROUSSEL – Ingénieur hospitalier (Centre hospitalier régional universitaire de Besançon) – Spécialités : microbiologie, pathologies respiratoires et allergiques, microorganisme de l'environnement.

M. Rémy SLAMA – Directeur de recherche (Institut national de la santé et de la recherche médicale) – Epidémiologie environnementale, reproduction et fertilité, santé des enfants, milieux aériens et environnement, perturbateurs endocriniens

Les travaux, objets du présent rapport, ont été aussi soumis pour avis et commentaires au CES suivant :

- CES « « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » »

Président

M. Michel GUERBET – Professeur de toxicologie à l'UFR médecine pharmacie de Rouen - Pharmacien toxicologue

Vice-président

M. Dominique LAFON – Médecin toxicologue, pilote de la thématique reproduction et travail à l'INRS – Médecine du travail, toxicologie, reprotoxicité

Membres

M. MARC BARIL - PROFESSEUR ASSOCIÉ À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL – CHIMISTE TOXICOLOGUE, VLEP

M. SYLVAIN BILLET – ENSEIGNANT CHERCHEUR / MAÎTRE DE CONFÉRENCE EN TOXICOLOGIE À L'UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE – TOXICOLOGIE RESPIRATOIRE, NANOMATÉRIAUX

MME MICHÈLE BISSON – RESPONSABLE D'ÉTUDE À L'INERIS – PHARMACIEN TOXICOLOGUE, TOXICOLOGIE GÉNÉRALE - VTR

MME ANNE CHEVALIER – EPIDÉMIOLOGISTE RETRAITÉE DE L'INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE

M. FRANÇOIS CLINARD – EPIDÉMIOLOGISTE À L'INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE – PHARMACIEN TOXICOLOGUE, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES

MME FATIHA EL-GHISSASSI – SCIENTIFIQUE, SECTION DES MONOGRAPHIES DE IARC (IMO) CENTRE INTERNATIONAL DE RECHERCHE SUR LE CANCER - DOCTEUR ES SCIENCE EN BIOCHIMIE SPÉCIALISTE EN CANCÉROGÉNÈSE ET GÉNOTOXICITÉ

MME MOUNIA EL-YAMANI – RESPONSABLE D'UNITÉ À L'INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE – DOCTEUR ES SCIENCE EN BIOCHIMIE, TOXICOLOGIE, VLEP

M. CLAUDE EMOND – PROFESSEUR ADJOINT DE CLINIQUE À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL – TOXICOLOGIE, MODÈLE PBPK, TOXICOCINÉTIQUE, NANOTOXICOLOGIE, PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

M. GUILLAUME GARCON – PROFESSEUR DE TOXICOLOGIE À L'UNIVERSITÉ DE LILLE 2 – TOXICOLOGIE GÉNÉRALE, CANCÉROLOGIE, MODÈLES EXPÉRIMENTAUX, TOXICOLOGIE RESPIRATOIRE, POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

M. LUDOVIC LE HEGARAT – CHEF D'UNITÉ ADJOINT TOXICOLOGIE DES CONTAMINANTS - ANSES – LABORATOIRE DE FOUGÈRES- TOXICOLOGIE, GÉNOTOXICITÉ, NANOMATÉRIAUX

M. KARIM MAGHNI – DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL – TOXICOLOGIE, IMMUNOLOGIE, ASTHME, ALLERGIES, NANOMATÉRIAUX

MME VÉRONIQUE MALARD – INGÉNIEUR CHERCHEUR EN TOXICOLOGIE AU COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES, CENTRE DE MARCOULE. – TOXICOLOGIE « *IN VITRO* », BIOLOGIE CELLULAIRE, NANOTOXICOLOGIE, PROTÉOMIQUE.

M. FABRICE MICHIELS – MÉDECIN DU TRAVAIL / TOXICOLOGUE AU SERVICE DE SANTÉ DES ARMÉES

M. JEAN-PAUL PAYAN – CHEF DU LABORATOIRE PÉNÉTRATION CUTANÉE, CINÉTIQUE ET MÉTABOLISME À L'INRS, NANCY – PHARMACIEN TOXICOLOGUE, TOXICOCINÉTIQUE

MME MARIE-ANNE ROBIN – DIRECTEUR DE RECHERCHE À L'INSERM – PHARMACIEN TOXICOLOGUE, BIOCHIMIE, HÉPATOTOXICITÉ, PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

M. HENRI SCHROEDER – ENSEIGNANT CHERCHEUR À L'URAFPA, INRA USC 340, FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES, UNIVERSITÉ DE LORRAINE - PHARMACIEN BIOLOGISTE, NEUROTOXICITÉ

M. ALAIN SIMMONARD – CHEF DE DÉPARTEMENT À L'INRS, NANCY - PHARMACIEN TOXICOLOGUE, TOXICOLOGIE GÉNÉRALE ET REPROTOXICITÉ, ANATOMOPATHOLOGIE

M. OLIVIER SORG – CHEF DE GROUPE DE RECHERCHE À L'UNIVERSITÉ DE GENÈVE – DOCTEUR ES SCIENCE EN BIOCHIMIE, TOXICOLOGIE EXPÉRIMENTALE, DERMATOTOXICOLOGIE

MME LYDIE SPARFEL – PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1 / IRSET 'INSTITUT DE RECHERCHE EN SANTÉ, ENVIRONNEMENT ET TRAVAIL' UMR INSERM 1085– PHARMACIEN TOXICOLOGUE, IMMUNOTOXICOLOGIE, TOXICOGÉNOMIQUE, CANCÉROLOGIE, BIOLOGIE CELLULAIRE ET MOLÉCULAIRE

M. JÉRÔME THIREAU – CHARGÉ DE RECHERCHE AU CNRS – DOCTEUR ES SCIENCE, PHYSIOLOGIE ANIMALE, BIOLOGIE CELLULAIRE, CARDIOTOXICITÉ

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

M. Mohammed LOUNIS – Chef de projets scientifiques – Anses

Contribution scientifique

M. Mohammed LOUNIS – Chef de projets scientifiques – Anses

Secrétariat administratif

Mme Séverine BOIX – Anses

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Mme Sylvie LAUMOND – Médecin de santé publique à la Direction des Affaires Sanitaires et Sociales de Nouvelle-Calédonie

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	9
Sigles, abréviations, et glossaire	13
Liste des tableaux	14
Liste des figures	14
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine.....	15
1.1 Contexte	15
1.2 Objet de la saisine	15
1.3 Modalités de traitement	15
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	16
2 Définitions et rappels	17
2.1 Fibres et particules minérales allongées	17
2.2 Fibre asbestiforme	17
2.3 Amiante	18
2.4 Fragments de clivage	20
3 Rappels sur les effets sanitaires de l'amiante et sur la réglementation...	21
3.1 Les effets sanitaires de l'amiante	21
3.1.1 Expositions à l'amiante et mésothéliome.....	21
3.1.2 Expositions aux autres fibres et mésothéliome	22
3.2 Réglementation concernant l'exposition à l'amiante en France.	23
3.2.1 Exposition professionnelle	23
3.2.2 Exposition dans l'air intérieur.....	23
3.2.3 Exposition en environnement extérieur	23
3.3 Réglementation concernant l'exposition à l'amiante en Nouvelle-Calédonie	23
4 Minéralogie, géologie et occurrence de l'antigorite	26
4.1 Place de l'antigorite dans la minéralogie des serpentines.	26
4.2 Occurrence de l'antigorite	28
4.3 Distinction et stabilité respectives des serpentines	29
4.4 L'antigorite en Nouvelle-Calédonie	30
5 Effets sanitaires de l'antigorite.....	36
5.1 Données expérimentales	36
5.1.1 Études « <i>in vitro</i> »	36
5.1.2 Étude « <i>in vivo</i> »	42
5.2 Données épidémiologiques	43
5.2.1 Incidence du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie	44

5.2.2	Étude sur les facteurs de risque du mésothéliome (2007)	44
5.2.3	Étude sur les facteurs de risque du mésothéliome (2011)	45
5.2.4	Synthèse des études épidémiologiques	47
6	Toxicologie des silicates fibreux non classés « amiante »	50
6.1	Rappels de minéralogie	50
6.2	Problématique générale de la toxicité des fibres	51
6.3	Silicates asbestiformes non classés amiantes	52
6.3.1	Données sur les minéraux asbestiformes appartenant aux mêmes groupes que les amiantes	53
6.3.2	Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes sous-classes que les minéraux dits amiantes	54
6.3.3	Données sur les minéraux asbestiformes d'autres sous-classes que les amiantes	55
6.4	Silicates non asbestiformes	56
6.4.1	Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes groupes que les amiantes	56
6.4.2	Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes sous-classes que les amiantes	58
6.5	Paramètres intrinsèques modulant la toxicité des fibres	63
6.5.1	Critères dimensionnels	63
6.5.2	Mécanismes physiopathologiques	65
6.5.3	Morphologie des particules minérales	65
6.5.4	Composition chimique	66
6.5.5	Solubilité	67
6.5.6	Clairance, durabilité et biopersistance	67
6.6	Mécanismes d'action toxique	68
7	Conclusion	70
8	Bibliographie	72
8.1	Publications	72
8.2	Normes	83
ANNEXES		84
Annexe 1 : Lettre de saisine		85
Annexe 2 : Quelques repères minéralogiques des minéraux mentionnés dans ce rapport		88
Annexe 3 : Textes de la délibération n° 82 du 25 août 2010 et de l'arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010 de Nouvelle-Calédonie		93

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions

Présentation de la question posée

L'Anses a été saisie conjointement le 07/08/2012 par la direction générale de la prévention des risques, la direction générale de la santé et la direction générale du travail à la demande de la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de la Nouvelle-Calédonie afin de réaliser une analyse critique de la littérature scientifique relative à la toxicité de l'antigorite. Il était également demandé d'examiner si la littérature scientifique disponible permet de différencier les effets sur la santé de l'antigorite selon qu'elle est sous forme fibreuse, non fibreuse ou de fragments de clivage. Enfin la saisine précise que les résultats des travaux d'expertise devront permettre de juger de l'opportunité de préciser le champ d'application de la réglementation en Nouvelle-Calédonie, dans le but d'orienter les moyens de prévention vers les situations qui le nécessitent prioritairement.

Contexte scientifique et réglementaire

L'amiante est un terme commercial générique relatif à six fibres minérales¹ dites asbestiformes², à savoir le chrysotile qui est une serpentine et l'amosite, la crocidolite, l'actinolite-amiante, l'anthophyllite-amiante et la trémolite-amiante qui sont des amphiboles. Le groupe des serpentines comprend également d'autres minéraux dont l'antigorite et la lizardite.

Le Centre international de recherche sur le cancer en 1977 a clairement confirmé la cancérogénicité pleurale et bronchique des 6 fibres d'amiante mentionnées ci-dessus. En 2012, il a également indiqué que les preuves étaient suffisantes pour considérer l'amiante comme un facteur de risque avéré des cancers du larynx et de l'ovaire.

Ces six fibres d'amiante sont classées par la réglementation européenne et française comme des agents cancérogènes avérés pour l'Homme³. En Europe et en France, les réglementations relatives à la protection des travailleurs vis-à-vis des risques liés à une exposition à l'amiante s'appliquent uniquement aux six fibres minérales asbestiformes précédemment citées. Ainsi, l'antigorite et d'autres minéraux du même groupe comme la lizardite ne sont pas prises en compte dans le cadre de la réglementation applicable à l'amiante.

Les données géologiques et minérales particulières de Nouvelle-Calédonie relatives à la problématique des occurrences naturelles de ces fibres minérales asbestiformes ou « amiante » ont conduit les autorités locales à adopter en 2010 une délibération spécifique pour la protection des travailleurs susceptibles d'être exposés à des poussières issues de terrains présentant ces occurrences d'amiante, pour les activités relatives aux travaux de bâtiment et travaux publics et aux activités extractives. Cette législation a inclus l'antigorite dans la liste des fibres considérées comme de l'amiante.

¹ L'Organisation mondiale de la santé (OMS) définit une fibre comme une particule allongée à bords parallèles ayant un rapport longueur sur diamètre supérieur à 3, une longueur supérieure ou égale à 5 µm et un diamètre inférieur à 3 µm.

² Le terme asbestiforme n'a pas été défini pour des besoins réglementaires. Il fait référence à une morphologie provenant d'une cristallisation naturelle et unidimensionnelle d'un minéral donnant des fibres ayant l'apparence de cheveux.

³ Cf. directive 93/72/CEE de la Commission du 1^{er} septembre 1993, portant dix-neuvième adaptation au progrès technique de la directive 67/548/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses et arrêté du 20 avril 1994 relatif à la déclaration, la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses.

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » l'instruction de cette saisine. Elle a également demandé au CES « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » d'apporter sa contribution dans l'expertise, en particulier en ce qui concerne l'appréciation des données de toxicité disponibles.

Les travaux d'expertise ont été réalisés par l'Anses et cinq experts rapporteurs couvrant les domaines de compétence de la géologie, la minéralogie, la toxicologie et l'épidémiologie.

Le rapport d'expertise tient compte des observations et des remarques transmises par les membres des deux CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

Modalités de traitement

Les experts ont passé en revue l'ensemble des données disponibles relatives à la saisine. En particulier, ils ont procédé à l'examen des données transmises par la Direction des affaires sociales et sanitaires et par la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de Nouvelle-Calédonie. Ils ont également recensé et analysé l'ensemble des études de toxicité et des études épidémiologiques disponibles relatives à l'antigorite.

Étant donné le très faible nombre d'études spécifiques à l'antigorite, les experts ont également procédé à l'examen des données de toxicité relatives aux fibres minérales allongées de la famille des silicates, dont elle fait partie, afin d'identifier des éléments complémentaires utiles à l'expertise.

Résultats de l'expertise collective

Minéralogie de l'antigorite

L'antigorite appartient au groupe des serpentines, qui appartient à la sous classe minéralogique des phyllosilicates, caractérisés par une structure cristallographique en feuillets (silicates lamellaires). L'antigorite est ainsi un silicate de la même classe minéralogique que le chrysotile et la lizardite avec lesquels elle partage la même composition chimique générique mais dont elle se différencie par sa structure tridimensionnelle. Ces trois minéraux se distinguent également par leurs réponses respectives aux contraintes du réseau cristallin. De façon générale, l'antigorite se présente sous une forme plutôt prismatique mais plusieurs auteurs ont signalé l'existence de formes fibreuses d'antigorite.

La distinction entre les trois minéraux les plus abondants des serpentines, à savoir le chrysotile, l'antigorite et la lizardite, et la détermination de leurs caractéristiques dimensionnelles sont obtenues de manière univoque par l'utilisation de deux méthodes complémentaires, la spectrométrie Raman à transformée de Fourier et la microscopie électronique à transmission couplée à un analyseur élémentaire.

Géologie de l'antigorite en Nouvelle-Calédonie

En Nouvelle Calédonie, des occurrences à antigorite sont connues dans trois unités géologiques, celles du Diahot, de la Boghen et de la Nappe des péridotites. Cependant, les études de contexte géologique, de caractérisation minéralogique et d'occurrences des roches renfermant des fibres minérales asbestiformes, dites amiantifères, ont été majoritairement ciblées sur la Nappe des péridotites, en raison de la présence de travaux d'extraction minière. La Nappe des péridotites couvre à elle seule un tiers de la surface de la Grande Terre.

Dans la Nappe des péridotites, les occurrences à antigorite sont connues dans presque tous les massifs pouvant être exploités dans le cadre d'activités minières, avec des fréquences très variables d'un massif à l'autre ou même d'un secteur à l'autre d'un même massif. Ces occurrences correspondent à des veines d'épaisseur centimétrique à décimétrique décrites sous la dénomination de « plan à antigorite » ou de « plan à cristallisations fibro-lamellaires ». Les analyses réalisées à partir de ces structures ont montré d'une part, que du chrysotile est associé d'une manière très étroite et presque systématique aux veines d'antigorite, et d'autre part que des assemblages trémolite-amiante / antigorite existent.

En outre, soumises à l'altération naturelle, ces veines à antigorite se désagrègent en un matériau blanchâtre, constitué par un mélange de fibres très fines et de fragments rigides correspondant à des particules hétérométriques d'antigorite encore appelés « amas fibro-lamellaires ». Les données analytiques obtenues à partir de ces structures à antigorite très altérées et *pro parte* désagrégées montrent que la fraction la plus fine des particules minérales observées possède des caractéristiques morphométriques qui sont celles des fibres au sens de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Il y a donc lieu de distinguer au sein de l'antigorite, des formes fibreuses et non fibreuses, qui sont très habituellement mélangées.

Données toxicologiques et épidémiologiques spécifiques à l'antigorite

Les études expérimentales relatives à la toxicité de l'antigorite, réalisées aussi bien dans des conditions *in vitro* qu'*in vivo*, sont rares. Ainsi, seules 7 études ont été recensées :

- Les quatre premières sont des études antérieures à 1991 et portent sur les effets de l'antigorite non fibreuse sur des cultures cellulaires. L'antigorite y a été utilisée comme « témoin minéral non fibreux » en comparaison de deux minéraux fibreux classés amiante : le chrysotile et la crocidolite. Les résultats montrent une activité *in vitro* faible sinon nulle de l'antigorite non fibreuse, en tant qu'agent promoteur de tumeurs ou plus globalement favorisant la prolifération cellulaire.
- Deux autres études plus récentes (2007 et 2010) portent sur les effets de l'antigorite fibreuse sur des cultures cellulaires. Dans ces études, les auteurs ont comparé l'activité cytotoxique de cette forme d'antigorite à celle obtenue avec des cellules témoins non exposées d'une part, et avec des cellules exposées à la crocidolite d'autre part. Elles montrent que l'antigorite fibreuse est cytotoxique à forte dose, cet effet pouvant correspondre soit à un effet de surcharge soit à un « effet fibre » non spécifique de cette espèce minérale.
- La seule étude *in vivo* date de 1993. Elle utilise, en injections intrapéritonéales chez les rongeurs, d'extraits minéraux à fortes doses, dont certains contiennent de l'antigorite, sans précision de forme, mais aussi d'autres serpentines et du quartz. Elle est de ce fait difficilement interprétable.

Les données épidémiologiques disponibles sont en faveur d'une origine principalement environnementale de l'excès de cas de mésothéliomes, observé en Nouvelle-Calédonie. Une seule étude épidémiologique, relative à l'antigorite, a été retrouvée dans la littérature. Cette étude, de type écologique, avait comme objectif de tester les éventuelles relations entre la survenue de mésothéliomes au sein des populations vivant en Nouvelle-Calédonie et différents facteurs de risque environnementaux. Cette étude met en avant la présence de serpentines comme facteur de risque, sans pouvoir toutefois individualiser l'antigorite en elle-même comme facteur de risque du mésothéliome.

Données toxicologiques relatives aux fibres minérales allongées de la famille des silicates

Une revue des données de la littérature sur la toxicité des autres fibres minérales de la famille des silicates non classées « amiante », appelées d'une façon générique « particules minérales allongées », a permis de faire la synthèse sur les différents facteurs influençant leur toxicité. Les facteurs étudiés étaient aussi bien dimensionnels que physico-chimiques, tels que : la longueur, le

diamètre, le rapport d'allongement, la surface, la solubilité, le potentiel de dépôt et de clairance, la biopersistance et la réactivité de surface. Il apparaît ainsi que la part respective de ces facteurs est encore loin d'être élucidée. De même, la morphologie asbestiforme de ces particules minérales allongées n'a pas été retenue comme critère discriminant de toxicité car elle ne fait pas l'objet d'un consensus scientifique.

Conclusion de l'expertise collective

- Les données géologiques et minéralogiques de Nouvelle-Calédonie, actuellement disponibles, montrent que d'une part, le chrysotile est associé de manière très étroite et presque systématique à l'antigorite, et que d'autre part des assemblages à trémolite-amiante / antigorite existent.
- Les données existantes de toxicité spécifique à l'antigorite sont très insuffisantes et ne permettent ni d'affirmer ni d'infirmer son potentiel toxique, qu'elle soit sous forme fibreuse ou non fibreuse.
- Les données sur les effets toxiques des particules minérales allongées, dont font partie les formes fibreuses d'antigorite, suggèrent le rôle de différents paramètres comme la biopersistance, la réactivité de surface ou le critère dimensionnel. Toutefois en l'absence d'évaluation de ces paramètres pour l'antigorite, il n'est pas possible de conclure sur une éventuelle toxicité de l'antigorite fibreuse.
- La seule étude épidémiologique relative à l'antigorite ne permet pas de conclure sur l'effet propre de l'antigorite.

Aussi le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime qu'il n'est pas possible de statuer sur la contribution propre des différentes formes de l'antigorite dans la survenue du mésothéliome ou d'autres pathologies.

Recommandations

En l'état actuel des connaissances et concernant la situation particulière des expositions en Nouvelle-Calédonie, le CES « évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime qu'il faut considérer les occurrences et les affleurements à antigorite, quelle que soit sa forme, comme des situations comportant de manière presque systématique, une exposition à des fibres d'amiante. Le CES recommande de traiter ces situations comme les autres expositions aux fibres minérales asbestiformes dites « amiante » et d'appliquer strictement les mêmes mesures de prévention.

Le CES recommande d'examiner les possibilités de faire une campagne de reconnaissance plus fine des occurrences, notamment de l'antigorite, du chrysotile et de la trémolite, en utilisant les techniques les plus récentes d'identification des fibres minérales. Cette actualisation plus fine de la cartographie pourrait éventuellement permettre de hiérarchiser les différentes zones de danger en fonction de la nature des fibres présentes et ainsi de mieux cibler les campagnes de métrologie et de prévention à mettre en œuvre.

Dans le cas où de l'antigorite fibreuse non liée à des fibres d'amiante serait retrouvée dans certaines zones, il faudra réaliser des études de toxicité de cette forme d'antigorite conformes aux bonnes pratiques actuellement recommandées.

Au delà de la problématique propre à l'antigorite en Nouvelle-Calédonie, le CES « Évaluation des risques liés aux milieux aériens » estime souhaitable de reconsidérer l'approche actuelle des particules minérales allongées et plus précisément des silicates fibreux. Dans ce cadre, la possibilité offerte par les nanotechnologies de produire des fibres de composition et de dimensions maîtrisées peut permettre le développement de nouvelles études de toxicité expérimentale assurant une meilleure comparabilité et reproductibilité des résultats.

Le comité d'experts spécialisé « **Évaluation des risques liés aux milieux aériens** » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions, objets du présent rapport lors de sa séance du jour/mois/année et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 15 mai 2014

Sigles, abréviations, et glossaire

ADN : Acide désoxyribonucléique

Afsset : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail.

AFNOR : Association française de normalisation

ATA : actinolite, trémolite, anthophyllite, acronyme utilisé pour évoquer ces trois minéraux.

ATSDR: Agency for toxic substances disease registry

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

BT-HP : basse température-haute pression

BTP : Bâtiment et des travaux publics

Circ : Centre international de recherche sur le cancer.

CES : Comité d'experts spécialisés

DASS : Direction des affaires sanitaires et sociales

DIMENC : Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de la Nouvelle-Calédonie.

DTA : analyse thermodifférentielle

EADO (espèces actives dérivées de l'oxygène) et EADN (espèces actives dérivées de l'azote): par souci d'homogénéité avec les publications antérieures de l'Anses, cet intitulé sera utilisé dans le présent rapport pour qualifier les molécules souvent dénommées « espèces réactives de l'oxygène » ou « espèces réactives de l'azote » dans d'autres publications.

US-EPA : Environmental Protection Agency (agence de protection environnementale américaine)

Erk 1/2: Extracellular signal-regulated kinase 1 et 2.

FCA : Fibres courtes d'amiante

FFA : Fibres fines d'amiante

FT Raman : spectroscopie Raman à transformée de Fourier

GIP CNRT : Groupement d'intérêt public - Centre national de recherche technologique

HTE : Hamster trachea epithelial

IMA : International mineralogical association

INSERM: Institut national pour la santé et la recherche médicale.

InVS: Institut national de veille sanitaire.

IARC: International agency for research on cancer

IC : Intervalle de confiance

LDH : lactate dehydrogenase

LEPI : Laboratoire d'étude des particules inhalées

Ma : millions d'années

MAP kinase : Mitogen-activated protein kinases

MEB : Microscopie électronique à balayage

MET : microscopie électronique à transmission

META : microscopie électronique à transmission analytique

MOCP : microscopie optique à contraste de phase

Oc : Octaèdre

OMS: Organisation mondiale de la santé

OR: Odds ratio

OSHA: Occupational safety and health administration.

NIOSH: National institute for occupational safety and health. Etats-Unis

P : pression

PGE2 : prostaglandine E2

PMA : particules minérales allongées (ou elongated minerals particules en anglais)

SGNC : Service de Géologie de Nouvelle-Calédonie

SMR: Standardized mortality ratio (taux de mortalité standardisé)

T : température

Te : Tétraèdre

VEGF: vascular endothelial growth factor (facteur de croissance de l'endothélium vasculaire)

VLEP : Valeur limite d'exposition professionnelle.

WHO: World Health Organization

Liste des tableaux

Tableau 1 : Minéraux asbestiformes réglementés comme « amiantes » et leurs homologues non « amiantes » ayant la même composition chimique. _____	19
Tableau 2 : Principaux minéraux du groupe des serpentines _____	27
Tableau 3: Synthèse des études de toxicité <i>in vitro</i> ayant mis en œuvre l'antigorite sous ses diverses présentations morphologiques. _____	39
Tableau 4 : Minéraux cités, leur place dans la classification et leur composition chimique _____	51
Tableau 5 : Principaux minéraux évoqués dans le rapport _____	61
Tableau 6 : Classification minéralogique de Dana - 8ème édition (d'après Gaines <i>et al</i> , 1997) _____	91

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de l'arrangement des couches tétraédrique (en rouge) et octaédrique (en bleu) pour les minéraux du groupe des serpentines. _____	28
Figure 2 : Représentation des types de fibre d'amiante selon leurs caractéristiques dimensionnelles (Rapport Afsset, 2009) _____	64
Figure 3 : Représentation schématique des arrangements tétraédriques _____	89

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

L'expertise fait suite à une saisine conjointe, du 9 août 2012⁴, de la direction générale de la prévention des risques (DGPR), la direction générale de la santé (DGS), et la direction générale du travail (DGT), à la demande de la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie (DIMENC) de la Nouvelle-Calédonie.

Cette saisine s'appuie sur les données particulières de la Nouvelle-Calédonie, relatives aux « occurrences naturelles d'amiante », et « dont l'impact sanitaire a déjà été démontré », selon les termes de la demande. Cette saisine précise que « cette spécificité a conduit les autorités à initier plusieurs études de terrain, et à adopter en 2010 une législation relative à la prévention des risques professionnels liés aux poussières issues de terrains amiantifères, qui est spécifique à ce territoire ».

Ainsi, la réglementation relative aux « fibres d'amiante » en milieu professionnel en Nouvelle-Calédonie diffère substantiellement de celle en vigueur en France et au sein de la communauté européenne :

- La directive européenne 2009/148/CE relative à la protection des travailleurs contre les risques liés à une exposition à l'amiante pendant le travail n'inclut pas l'antigorite dans la liste des minéraux pris en compte.
- La délibération n°82 du 25 août 2010 de la Nouvelle-Calédonie, relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics, inclut l'antigorite dans la liste des minéraux pris en compte.

1.2 Objet de la saisine

A l'appui de la demande, la saisine indique que « les travaux géologiques de reconnaissance et de typologie des occurrences amiantifères » d'une part, et « les enseignements pouvant être tirés en parallèle de certaines études toxicologiques » d'autre part, « tendent à mettre en évidence l'existence de différents faciès d'antigorite sur le sol calédonien, ainsi que la suspicion d'effets sanitaires associés sans distinction entre ces différents faciès. »

Cette saisine précise que le but de l'expertise demandée est d'obtenir une analyse critique des données de la littérature scientifique sur ce sujet, et en particulier de savoir si ces données permettent de distinguer les effets toxiques des différents faciès d'antigorite entre elles (antigorite fibreuse et non fibreuse).

Enfin, la demande indique que « l'expertise devra permettre de juger de l'opportunité de préciser le champ d'application de la réglementation en Nouvelle-Calédonie, dans le but d'orienter les moyens de prévention vers les situations qui le nécessitent prioritairement. »

1.3 Modalités de traitement

L'Anses a confié à un groupe d'experts rapporteurs l'instruction de cette saisine. Leurs domaines de compétence sont :

- la géologie et la minéralogie,
- la toxicologie,
- l'épidémiologie.

⁴ La saisine figure en annexe 1 de ce rapport.

Les experts ont passé en revue l'ensemble des données disponibles relatives à la saisine ; en particulier, ils ont procédé à l'examen des données transmises par la Direction des affaires sociales et sanitaires (DASS), et par la Direction de l'industrie, des mines et de l'énergie (DIMENC) de Nouvelle-Calédonie. Ils ont aussi recensé l'ensemble des données de toxicité et des données épidémiologiques relatives à l'antigorite.

La saisine porte sur l'évaluation des effets sanitaires des différentes formes d'antigorite, fibreuse et non fibreuse. Deux raisons principales ont conduit les experts à étendre leurs travaux à d'autres silicates susceptibles de se présenter sous une forme fibreuse :

- cette question d'une différence de toxicité se pose également pour les homologues non asbestiformes des 5 amphiboles classées amiantes ;
- le nombre d'études spécifiques à l'antigorite est très faible.

Ainsi, les experts ont abordé dans un premier temps les principaux aspects minéralogiques des fibres silicatées non classées amiantes. Un développement particulier, géologique et minéralogique sur l'antigorite est présenté.

Dans un second temps, les experts ont analysé les données disponibles sur les effets sanitaires de l'antigorite, et celles des autres fibres silicatées non classées amiantes.

L'expertise a été réalisée sous l'égide du Comité d'Experts Spécialisés (CES) « Évaluation des risques liés aux milieux aériens ».

Les travaux ont été soumis régulièrement au CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques). Ils ont été soumis pour commentaires et avis au CES « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence ».

Le rapport produit par le groupe d'experts tient compte des observations et des éléments complémentaires transmis par les membres des deux CES.

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

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

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

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

Les déclarations d'intérêts des experts sont rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

2 Définitions et rappels

Pour la rédaction de ce rapport, les définitions et les terminologies suivantes sont retenues par les auteurs⁵.

2.1 Fibres et particules minérales allongées

Le rapport se base sur la définition que donne l'OMS d'une fibre. Celle-ci la considère comme une particule allongée à bords parallèles ayant un rapport longueur sur diamètre supérieur à 3, et dont la longueur et le diamètre doivent être respectivement supérieur ou égal à 5 microns, et inférieur à 3 microns ; ces dimensions devant être déterminées par microscopie optique à contraste de phase (WHO, 1986).

Ainsi, le terme « fibre » recouvre toutes les particules minérales allongées (PMA), aussi bien les asbestiformes que les non asbestiformes (dont les fragments de clivage). De même, ce terme inclut l'ensemble des particules allongées non minérales et répondant aux critères dimensionnels de l'OMS.

2.2 Fibre asbestiforme

Le terme asbestiforme n'a pas été défini pour des besoins réglementaires. Il fait référence à une morphologie provenant d'une cristallisation naturelle et unidimensionnelle d'un minéral donnant des fibres ayant l'apparence de cheveux. Cette morphologie confère au minéral des caractéristiques particulières dont un rapport d'allongement élevé (rapport longueur/diamètre), des propriétés mécaniques accrues (dont la résistance, la flexibilité, et la durabilité).

Cette morphologie asbestiforme est le résultat d'une croissance cristalline qui a abouti à des fibres longues et filiformes. Ces fibres sont rassemblées dans des faisceaux pouvant facilement se séparer en plus petites fibres (fibrilles). Ces dernières peuvent conserver leurs propriétés de surface et leur activité lors des différents procédés de transformation. Selon l'OSHA, le caractère asbestiforme ne dépend pas de la structure cristalline de la fibre, mais plutôt de la manière dont le cristal croît (OSHA, 1992).

Pour sa part, l'EPA propose une définition de la morphologie asbestiforme qui permet de différencier les minéraux asbestiformes des fragments de clivage (EPA, 1993) (traduction libre):

« Un minéral qui est comme l'amiante, c'est-à-dire cristallisé dans une morphologie d'amiante.

Certains minéraux asbestiformes peuvent ne pas avoir les qualités qui donnent à l'amiante sa valeur commerciale, telles que la longueur et la haute résistance à la traction.

En microscopie optique, la morphologie asbestiforme est généralement reconnue par les caractéristiques suivantes :

- *Le rapport d'allongement (longueur/diamètre) varie de 20:1 à 100:1 (et plus encore pour des fibres de longueur supérieure à 5 µm) ;*
- *Les rapports d'allongement doivent être déterminés pour les fibres et non pour les faisceaux ;*

⁵Les définitions retenues dans ce rapport sont également celles qui l'avaient été dans le rapport de l'Anses « Evaluation des risques relatifs au talc seul et au talc contaminé par des fibres asbestiformes et non asbestiformes » (Anses, 2012)

- *Fibrilles très fines, (diamètre inférieur à 0,5 µm);*
- *Deux caractéristiques ou plus parmi les suivantes :*
 - *Fibres parallèles regroupées en faisceaux*
 - *Faisceaux de fibres avec des extrémités effilochées*
 - *Agglomérats de fibres individuelles enchevêtrées*
 - *Fibres incurvées.»*

Le NIOSH (2011) cite également, en annexe de son rapport sur les particules minérales allongées, d'autres définitions du terme « asbestiforme », selon différentes sources.

2.3 Amiante

L'amiante est un terme commercial qui désigne six minéraux naturels, des silicates hydratés, appartenant à deux groupes : le groupe des serpentines et celui des amphiboles. Sa valeur commerciale lui est conférée par différentes propriétés particulières, dont : la faible conductivité électrique et thermique, la bonne stabilité chimique, la durabilité, la haute résistance à la traction, la flexibilité, etc.

Il existe une certaine confusion associée à la terminologie « amiante », qui n'est pas utilisée de façon uniforme par les différents spécialistes qui interviennent dans ce domaine (minéralogistes, hygiénistes, médecins du travail, épidémiologistes, chimistes ou analystes, etc.), et les différents organismes scientifiques et réglementaires.

Cette confusion est entretenue par les difficultés d'identification, selon les méthodes utilisées, des fibres asbestiformes et non asbestiformes en référence à la norme NFX 43-050 de Janvier 1996 (AFNOR, 1996). En effet, plusieurs silicates peuvent se présenter sous les deux formes : asbestiforme et non asbestiforme.

Le tableau 1 énumère les six minéraux dont la variété fibreuse (asbestiforme) est réglementée⁶ sous le terme « amiante », ainsi que leurs homologues (ayant la même composition chimique) non asbestiformes, et qui ne sont pas réglementés comme de l'amiante. Dans le groupe des serpentines, les minéraux répertoriés dans le tableau 1 sont des espèces minérales distinctes.

⁶ Réglementation européenne : directive 2009/148/CE

Tableau 1 : Minéraux asbestiformes réglementés comme « amiantes » et leurs homologues non « amiantes » ayant la même composition chimique.

Minéraux « amiantes » (N° CAS)	Composition chimique	Minéraux non « amiantes » (N° CAS)
Groupe des serpentines		
Chrysotile (12001-29-5)	$[Mg_3Si_2O_5(OH)_4]_n$	Antigorite (12135-86-3) Lizardite (12161-84-1)
Groupe des amphiboles		
Amiante actinolite (77536-66-4)	$[Ca_2(Mg, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	Actinolite (13768-00-8)
Amiante anthophyllite (77536-67-5)	$[(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	Anthophyllite (17068-78-9)
Amiante trémolite (77536-68-6)	$[Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	Trémolite (14567-73-8)
Amosite (12172-73-5)	$[(Mg, Fe^{2+})_7Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	Grunérite (14567-61-4)
Crocidolite (12001-28-4)	$[NaFe^{2+}_3Fe^{3+}_2Si_8O_{22}(OH)_2]_n$	Riébeckite (17787-87-0)

CAS : Chemical Abstract Service.

Dans le groupe des amphiboles, les formes asbestiformes et non asbestiformes de la trémolite, de l'actinolite et de l'anthophyllite ne portent pas un nom différent car ce sont des variétés des mêmes minéraux, minéralogiquement parlant; c'est pourquoi, dans différents textes réglementaires, le terme amiante ou asbestiforme est ajouté au nom du minéral. Amosite et crocidolite sont respectivement des variétés de la grunérite et de la riébeckite, ce ne sont pas des minéraux reconnus en tant que tels. Le minéral asbestiforme et son équivalent non asbestiforme ont la même composition chimique mais ils diffèrent par leur croissance cristalline.

Les minéraux non asbestiformes, présentés dans le tableau 1, n'ont pas fait l'objet d'applications commerciales. Ces minéraux, qui ont la même formule chimique que leurs correspondants asbestiformes, ne se développent pas de façon unidimensionnelle, mais plutôt de façon bi ou tridimensionnelle, donnant lieu à une morphologie plus massive.

Lorsqu'une pression ou une contrainte est appliquée, les minéraux non asbestiformes peuvent se fracturer facilement en fragments de clivage. Certaines particules sont aciculaires (en forme d'aiguilles) et le clivage en escalier sur les côtés de certaines particules est commun (Srebro et Roogli 1994).

Les particules ayant cette morphologie peuvent toutefois correspondre à la définition de fibres inhalables donnée par l'OMS lorsqu'elles sont observées au microscope (NIOSH, 2011). La

différence entre les fibres asbestiformes et les fibres non asbestiformes se situe donc bien dans leur processus de croissance cristalline.

2.4 Fragments de clivage

Les fragments de clivage peuvent avoir la même composition chimique que les fibres correspondantes d'amiante sans en avoir toutes les caractéristiques :

- de dimensions (longueur, diamètre et rapport d'allongement),
- de propriétés chimiques et physiques,
- de performances mécaniques.

Les fragments de clivage peuvent être formés lorsque des minéraux sont broyés. Une distinction claire entre les fragments de clivage et les fibres asbestiformes serait que la largeur des fragments de clivage est variable le long du même fragment (marches d'escalier), tandis que la largeur des fibres asbestiformes est relativement constante (bords parallèles), quelle que soit la longueur (Siegrist, 1980).

Au sein d'une population de fragments de clivage issus du broyage d'amphiboles non asbestiformes, une fraction peut correspondre à la définition d'une fibre, telle qu'indiquée dans la norme NFX 43-050.

Les distributions dimensionnelles de fibres peuvent être différenciées de celles des fragments de clivage, mais il peut s'avérer difficile en présence d'une seule particule de distinguer un fragment de clivage d'une fibre asbestiforme (ATSDR 2001; Meeker *et al.* 2003).

3 Rappels sur les effets sanitaires de l'amiante et sur la réglementation

3.1 Les effets sanitaires de l'amiante⁷

L'amiante provoque aussi bien des lésions bénignes (dont l'asbestose et les plaques pleurales) que des pathologies malignes (mésothéliomes et autres cancers, essentiellement de l'appareil respiratoire).

Les risques de fibrose pulmonaire, appelée aussi asbestose, sont associés à des niveaux relativement élevés d'exposition à l'amiante. Les autres pathologies pleurales bénignes les plus fréquentes sont les plaques pleurales calcifiées ou non, et les épaissements pleuraux diffus.

Le cancer du poumon est l'une des pathologies malignes associées à l'exposition à l'amiante. Le risque est amplifié en cas d'exposition simultanée à l'amiante et au tabac, mais il est aussi établi chez les non fumeurs. Le temps moyen de latence entre l'exposition et la survenue de la maladie varie de 10 à 20 ans. De plus, le Centre international de recherche sur le cancer (Circ) a classé l'amiante comme cancérigène avec des preuves suffisantes pour les cancers du larynx et de l'ovaire (IARC, 2012). Le cancer colorectal fait l'objet d'une forte suspicion.

Le mésothéliome malin diffus est l'effet cancérigène caractéristique de l'exposition chronique aux fibres d'amiante. Il survient après une longue période de latence (pouvant atteindre 40 ans). C'est une tumeur primitive issue de la transformation néoplasique des cellules mésothéliales qui tapissent les séreuses. La plèvre constitue la localisation initiale la plus fréquente (environ 60% des cas) mais le péricarde, le péritoine, voire la vaginale testiculaire, seraient d'autres localisations possibles. Les tumeurs présentent de multiples remaniements cytogénétiques, incluant des délétions chromosomiques fréquentes. En général, plusieurs anomalies cytogénétiques sont présentes, suggérant qu'elles participent aux différentes étapes de l'initiation et/ou de la progression tumorale.

Le diagnostic de mésothéliome malin est parfois difficile. En France, il existe une procédure de certification des cas difficiles par un groupe d'anatomopathologistes (Groupe Mésopath.). Cette méthode repose sur la recherche de consensus des diagnostics à partir de la relecture standardisée des lames par un panel d'anatomopathologistes d'une part, et des résultats de l'immunohistochimie d'autre part. Le mésothéliome n'a été codé dans la Classification Internationale des Maladies (CIM) qu'à partir de l'année 2000. Auparavant, il était inclus dans la catégorie plus large des « cancers de la plèvre ». Dans le cadre de la problématique amiante, le mésothéliome présente un intérêt particulier, dans la mesure où l'exposition à l'amiante est son seul facteur de risque avéré.

3.1.1 Expositions à l'amiante et mésothéliome

Les expositions à l'amiante d'origine professionnelle sont responsables de la très grande majorité des cas de mésothéliome. Les secteurs à risques les plus élevés sont retrouvés dans la construction et la réparation navale, la transformation et la fabrication de produits contenant de l'amiante et la fabrication d'éléments de construction en métal. La multiplicité des usages de l'amiante explique le nombre très important des personnes exposées à l'occasion de leurs activités professionnelles. Ainsi, deux études ont montré qu'environ un quart de tous les hommes salariés actuellement retraités en France a été exposé au moins une fois au cours de sa vie professionnelle à l'amiante (Imbernon *et al.* 1999 ; Goldberg *et al.* 2000)

⁷ Les données de ce chapitre sont extraites de l'expertise collective « cancers et environnement » (INSERM, 2008)

On considère qu'en dehors d'une exposition à des sources connues d'amiante, professionnelles ou non, l'incidence de base du mésothéliome est très faible (moins de 1 cas par million d'habitants et par an), et de fréquence égale chez les hommes et les femmes.

L'évolution de l'incidence du mésothéliome chez les hommes des pays industrialisés montre qu'une véritable pandémie est apparue à partir des années 1950, la progression étant environ de 5 à 10 % par an depuis cette période. Cette pandémie et sa dynamique sont en liaison étroite avec l'introduction et le développement de l'usage massif de l'amiante dans les pays industrialisés. La proportion des femmes subissant des expositions professionnelles à l'amiante étant bien moindre que celle des hommes, les taux d'incidence de mésothéliome sont en conséquence nettement inférieurs dans les populations féminines. Ainsi, la fraction de risque, de cancer de la plèvre et de mésothéliome, attribuable à des expositions professionnelles dans la population française était estimée à 83,2 % chez les hommes et à 38,3 % chez les femmes (InVS, 2010).

Dans un document récent, portant sur la modélisation de l'évolution de la mortalité par mésothéliome de la plèvre en France, les auteurs indiquent que le pic de mortalité par mésothéliome semble avoir déjà été atteint en France au début des années 2000 (avec de 600 à 800 décès annuels chez les hommes et de 100 à 200 chez les femmes). Ils précisent que cette mortalité décroît, et que selon les projections obtenues, elle devrait se stabiliser vers 2030 au niveau existant à la fin des années 1970 (InVS, 2012).

Les expositions à l'amiante peuvent également être d'origine environnementale, en liaison avec l'existence d'affleurements naturels. Ainsi, l'Anses indique dans son rapport de 2010, que :

« Des risques potentiels de pathologies liées à l'amiante sont envisageables sous certaines conditions d'exposition :

- *pour les populations à proximité de site industriel actuel ou passé (mines, carrières, etc.) ;*
- *pour des populations à proximité d'affleurements naturels non exploités à l'échelle industrielle mais pouvant être modifiés par l'activité humaine.*

Dans les deux cas précédents le risque intervient, ou est accru, si des matériaux sont mobilisés/utilisés localement : aménagement du territoire (construction, voiries, revêtements, etc.), utilisation d'enduit tel que le pö ou le luto, fabrication d'objets domestiques, etc.

En revanche, il n'est pas encore possible d'écarter ou de démontrer un risque potentiel pour des populations à proximité d'affleurements naturels d'amiante ne faisant pas l'objet d'une quelconque activité humaine (aucune mobilisation de matière amiantifère par l'Homme) ».

3.1.2 Expositions aux autres fibres et mésothéliome

Au cours des dernières années, l'usage des fibres d'amiante a été remplacé par celui de fibres minérales artificielles (laine de verre, de roche ou de laitier, fibres à usage spécial, fibres de céramique réfractaire) dont l'évaluation des propriétés et du potentiel cancérigène a fait l'objet d'expertises antérieures de l'Inserm (INSERM, 1999) et du Circ (IARC, 2002). Aucune des études épidémiologiques disponibles n'a montré d'excès de mésothéliomes chez les travailleurs exposés à ces fibres de remplacement. Cependant, des anomalies pleurales radiographiques étiquetées « plaques pleurales » ont été rapportées en excès dans l'industrie de production de fibres céramiques réfractaires aux États-Unis et en Europe. Sur la base d'expérimentations animales, certaines fibres minérales artificielles ont montré une réponse positive ou faiblement positive chez l'animal.

En plus des 6 minéraux classés « amiante » du tableau 1, le Circ a ajouté l'ériionite comme cancérigène avéré pour le risque de mésothéliome (IARC, 2012). Dans le même rapport, la fluoro-édénite est citée comme étant susceptible d'être associée à un excès de mésothéliomes en exposition environnementale.

3.2 Réglementation concernant l'exposition à l'amiante en France.

3.2.1 Exposition professionnelle

La valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP), actuellement en vigueur en France, est de 100 fibres par litre ; il s'agit d'une valeur évaluée sur une moyenne de 8 heures de travail. Le décret n°2012-639 du 4 mai 2012 relatif aux risques d'exposition à l'amiante prévoit que la VLEP passe à 10 fibres par litre au 1er juillet 2015.

Pour mesurer les expositions en milieu professionnel aux fibres d'amiante, la méthode d'analyse en vigueur, depuis l'arrêté du 14 août 2012, est la microscopie électronique à transmission analytique (META). Cette méthode, normalisée NF X 43-050 :1996, a remplacé la microscopie optique en contraste de phase (MOCP) utilisée jusqu'alors. Selon cette norme, une fibre est définie comme une particule allongée qui a des cotés parallèles ou étagés, ayant un rapport longueur /diamètre (L/d) égal ou supérieur à 3 :1 et une longueur minimale de 0,5 µm. Du point de vue réglementaire, seules les fibres ayant un rapport : longueur/diamètre (L/d) supérieur à 3 :1, une longueur (L) supérieure à 5 µm, et un diamètre inférieur à 3 µm, sont prises en compte. Les prélèvements doivent être effectués selon la norme XPX 43-269 d'avril 2012.

3.2.2 Exposition dans l'air intérieur

Depuis le décret n° 2001 - 840 du 13 septembre 2001, le diagnostic des flocages, calorifugeages et faux-plafonds pour rechercher la présence d'amiante est obligatoire dans tous les immeubles bâtis, construits avant le 1er juillet 1997, à l'exception des maisons individuelles. En cas de présence d'amiante, le décret prescrit d'évaluer l'état de conservation des matériaux afin de définir les actions à engager, en fonction de leur état.

- Si l'état est jugé bon, il faut une surveillance périodique tous les trois ans ;
- Si l'état est jugé moyen ou mauvais, il faut réaliser des mesures dans l'air. Si le niveau est supérieur à 5 fibres par litre, il y a obligation de prendre des mesures conservatoires et de réaliser des travaux.

La méthode de mesure normalisée pour mesurer les niveaux d'empoussièrement dans les immeubles bâtis est la même que celle utilisée en environnement professionnel citée ci-dessus : Méthode NF X 43-050 :1996

3.2.3 Exposition en environnement extérieur

Il n'y a pas à ce jour de réglementation spécifique concernant l'exposition à l'amiante en suspension dans l'air extérieur.

3.3 Réglementation concernant l'exposition à l'amiante en Nouvelle-Calédonie

Collectivité *sui generis*⁸ française, la Nouvelle-Calédonie bénéficie d'institutions conçues pour elle seule, et se voit transférer de manière progressive certaines compétences de l'État. La compétence en matière de santé publique lui est propre et ne revient pas à l'État, en application de la loi organique n°99-209 du 19 mars 1999, article 22. Conformément aux « accords de Nouméa » du 5 mai 1998, les ministères n'ont dans ces domaines qu'un rôle consultatif et l'accompagnement de la Nouvelle-Calédonie ne peut se faire qu'au moyen de recommandations présentées par le Haut Commissaire de la République, premier représentant de l'État.

La Nouvelle-Calédonie est organisée en trois provinces. Ces trois collectivités territoriales disposent d'une compétence de droit commun et s'administrent librement par des assemblées

⁸ Expression juridique pour désigner une catégorie de règles qui a son propre fonctionnement.

élues pour cinq ans au suffrage universel direct. Le Congrès du territoire, formé en partie par les trois assemblées de province réunies est compétent pour gérer les affaires communes à l'ensemble du territoire, notamment les principes directeurs du droit de l'urbanisme et des règles en matière de santé, d'hygiène publique et de protection sociale.

Ces compétences propres en matière de santé publique et de droit du travail font que les réglementations en vigueur en France métropolitaine ne sont pas applicables en Nouvelle-Calédonie. L'interdiction générale relative à l'amiante (fabrication, transformation, vente, etc.) est ainsi entrée en vigueur en Nouvelle-Calédonie au 1^{er} mars 2007 (Arrêté n° 2007-767/GNC du 22 février 2007), et comportait encore quelques dérogations jusqu'au 31 décembre 2011 (patins de freins, etc.) (Voir le rapport Anses relatif aux affleurements naturels d'amiante d'octobre 2010).

Pour la protection des travailleurs vis-à-vis des risques liés à l'amiante, la délibération n° 211/CP du 15 octobre 1997 (modifiée par la délibération n°82 du 25 août 2010) relative à la protection des travailleurs contre les risques liés à l'inhalation de poussières d'amiante est applicable aux activités de fabrication et de transformation de matériaux contenant de l'amiante, aux activités de confinement et de retrait de l'amiante ainsi qu'aux activités et interventions sur des matériaux ou appareils susceptibles de libérer des fibres d'amiante. Elle n'intègre pas les travaux ou activités de BTP ou génie civil sur des zones géographiques où la présence de roches asbestiformes est avérée ou fortement suspectée.

Ce texte indique que la concentration moyenne en fibres d'amiante dans l'air inhalé par un travailleur ne doit pas dépasser :

- 0,1 fibre par centimètre cube (soit 100 fibres par litre) sur huit heures de travail lorsque le chrysotile est la seule variété minéralogique d'amiante présente ;
- 0,1 fibre par centimètre cube sur une heure de travail dans les situations résiduelles où d'autres variétés minéralogiques d'amiante sont présentes, soit sous forme isolée, soit en mélange, y compris lorsqu'il s'agit d'un mélange contenant du chrysotile.

A noter que les fibres prises en compte sont celles de longueur supérieure ou égale à 5 microns, de largeur inférieure à 3 microns et dont le rapport longueur sur largeur excède 3. Ces valeurs doivent être contrôlées par un organisme agréé par l'Exécutif du Territoire au moins une fois par an. A noter que le chef d'établissement a également obligation d'effectuer des contrôles techniques par prélèvement au moins une fois par trimestre afin de garantir le respect de ces valeurs limites.

Pour les activités relatives aux travaux de bâtiment, aux travaux publics et aux activités extractives réalisées par des travailleurs susceptibles d'être exposés à l'inhalation de poussières d'amiante lors d'opérations relatives aux sols, dans des zones géologiquement susceptibles de contenir des matériaux amiantifères, la Nouvelle-Calédonie a adopté en 2010 une législation relative à l'exposition à l'amiante afin de protéger les travailleurs exposés dans le cadre qui lui est spécifique. Les deux textes de loi suivants précisent cette réglementation (voir annexe 3).

- La délibération n° 82 du 25 août 2010, relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics ;

Ce texte définit comme « matériaux amiantifères » les roches contenant les substances naturelles minérales cristallisées en forme de fibres en y incluant l'antigorite. Il considère les fibres comme étant des particules ayant un rapport longueur/diamètre supérieur ou égal à 3, des côtés approximativement parallèles et un diamètre inférieur à 3 µm. Les poussières d'amiante sont définies comme des poussières issues des matériaux amiantifères et contenant des fibres.

- L'arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010, pris pour l'application de la délibération suscitée ;

Cet arrêté précise les conditions d'application de la délibération. Il indique notamment que la concentration moyenne en fibres dans l'air inhalé par un travailleur ne doit pas dépasser 0,1 fibre par centimètre cube sur une heure de travail. Cette mesure est réalisée par microscopie optique

en contraste de phase (méthode du filtre à membrane selon la norme AFNOR XP X 43-269 de mars 2002).

4 Minéralogie, géologie et occurrence de l'antigorite

L'antigorite est un phyllosilicate du groupe des serpentines. Les phyllosilicates sont une sous-classe minéralogique de la classe des silicates (annexe 2), ils se caractérisent par une structure cristallographique en feuillet (silicate lamellaire) qui représente l'unité de clivage. Au sein de cette sous-classe, le groupe des serpentines de formule générale $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ se caractérise par une unité structurale de base d'environ 0,72 nm d'épaisseur constituée par l'empilement d'une chaîne de tétraèdre de silicium (Te) et d'une chaîne d'octaèdre de magnésium (Oc) (Deer *et al*, 1962 ; Deer *et al*, 2009).

La couche Te est constituée d'un assemblage plan de tétraèdres dont le centre est occupé par un cation, en théorie Si^{4+} , lié à 4 atomes d'oxygène. Les trois atomes d'oxygène constituant la base de chaque tétraèdre appartiennent à un même plan et vont être partagés avec les tétraèdres voisins pour définir un assemblage. Les oxygènes restants pointent vers la couche octaédrique adjacente à laquelle ils appartiennent aussi, et avec laquelle ils assurent la liaison. Ils s'organisent en un assemblage quasi compact.

La couche Oc est constituée d'octaèdres formés par un cation central, en théorie le Mg^{2+} , lié à 6 atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles. Trois par trois, les atomes d'oxygène appartiennent à deux plans différents à assemblage quasi compact.

Tous les sites octaédriques étant occupés, on parle de structure ou de feuillet tri-octaédrique. C'est l'agencement tridimensionnel de ces feuillets via des liaisons H (liaison inter foliaire) qui aboutit à l'habitus⁹ macroscopique de ces minéraux silicatés magnésiens hydratés pouvant contenir jusqu'à 13% en poids d'eau. Le terme de serpentinite est réservé à la dénomination de roches contenant une forte proportion de minéraux appartenant au groupe des serpentines.

4.1 Place de l'antigorite dans la minéralogie des serpentines.

La structure 1:1 (1 Te et 1 Oc) et la composition chimique générique des minéraux du groupe des serpentines présentent une simplicité toute relative (groupe minéralogique au sens de l'IMA, Mills *et al*, 2009). En réalité, les dimensions propres à chaque chaîne ne coïncident pas et leur superposition compacte induit des discordances géométriques. En effet, Oc est de 3 à 5% plus large que Te (Wicks et Whittaker, 1975). Il existe plusieurs possibilités de s'affranchir de ces divergences, et accommoder la superposition des deux chaînes (Deer *et al*, 1992), qui sont responsables des cristallographies et des morphologies inhabituelles rencontrées au sein de ces minéraux. Trois manières de faire coïncider au mieux les deux chaînes sont possibles (Wicks and O'Hanley, 1988 ; Deer *et al*, 2009) :

- par substitution d'un cation plus gros à la place du silicium tétraédrique et/ou d'un cation plus petit que le Mg octaédrique,
- par distorsion du réseau idéal octaédrique et/ou tétraédrique,
- par la courbure du feuillet avec la chaîne Te en position interne de cette courbure,
- et les combinaisons de ces trois possibilités.

Cette divergence dimensionnelle se répercute également sur les liaisons H interfoliaires qui tendent à maintenir linéaires les feuillets. Contraintes géométriques et possibilités de substitutions cationiques ont conduit à la proposition de différentes espèces minérales (minéraux). A l'heure actuelle (IMA, 2013 & 2013-10), on compte 15 espèces minérales reconnues appartenant au groupe des serpentines (tableau 2)

⁹ C'est un indicateur de l'aspect extérieur ou de l'apparence générale d'un minéral.

Tableau 2 : Principaux minéraux du groupe des serpentines

Nom	Formule chimique
Sous-groupe de l'antigorite	
Antigorite ¹⁰	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Sous-groupe de la lizardite	
Caryopilite	Mn ²⁺ ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Lizardite	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Népouite	Ni ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Greenalite	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺) ₂₋₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Sous-groupe de l'amésite	
Amésite	Mg ₂ Al(AlSi)O ₅ (OH) ₄
Berthierine	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Al) ₃ (Si, Al) ₂ O ₅ (OH) ₄
Brindleyite	(Ni, Al) ₃ (Si, Al) ₂ O ₅ (OH) ₄
Fraipontite	(Zn, Al) ₃ (Si, Al) ₂ O ₅ (OH) ₄
Kellyite	(Mn ²⁺ , Mg, Al) ₃ (Si, Al) ₂ O ₅ (OH) ₄
Manandonite	Li ₂ Al ₄ (Si ₂ AlB)O ₁₀ (OH) ₈
Cronstedtite	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺) ₃ (Si, Fe ³⁺) ₂ O ₅ (OH) ₄
Guidottiite	Mn ₂ Fe ³⁺ (SiFe ³⁺) ₂ O ₅ (OH) ₄
Sous-groupe du chrysotile	
Chrysotile ¹¹	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Pecoraite	Ni ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄

Les minéraux les plus communs des serpentines sont la lizardite, l'antigorite et le chrysotile. De même formule chimique générique, ils se distinguent par leurs réponses respectives aux contraintes du réseau cristallin et donc structurales (Evans *et al*, 2013).

La lizardite possède la géométrie idéale des liaisons H interfoliaires favorisée par des substitutions de Al et Fe³⁺ en place du Mg octaédrique et Si tétraédrique ce qui lui confère une structure cristalline plate visible macroscopiquement par l'habitus planaire des cristaux (figure 1). Al-lizardite, baumite (Mn, Fe, Al, Zn-lizardite) et Ni-lizardite sont des variétés minéralogiques de la lizardite. On notera qu'il existe une série (solution solide) entre la lizardite et la népouite depuis le pôle pur Mg vers un pôle mixte Ni-Mg, la népouite étant le pôle pur Ni.

¹⁰ Sa variété fibreuse appelée picrolite n'est pas reconnue par l'IMA ; antigorite M et T sont des polytypes

¹¹ Clinochrysotile, orthochrysotile et parachrysotile sont considérés comme des polytypes et ne sont pas reconnus par l'IMA

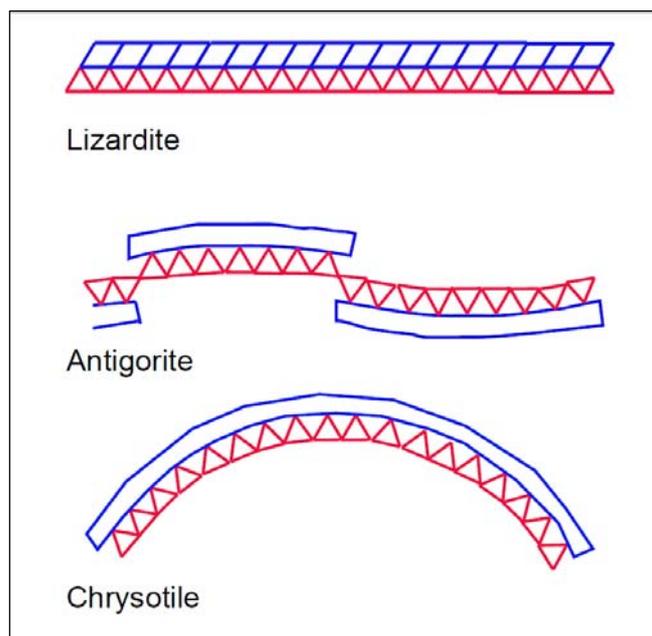


Figure 1 : Schéma de l'arrangement des couches tétraédrique (en rouge) et octaédrique (en bleu) pour les minéraux du groupe des serpentines.

Le chrysotile, première ressource d'amiante commerciale, minimise les contraintes géométriques et énergétiques (Baronnet & Devouard, 1996) en présentant une structure courbée des couches Te et Oc, les Te se trouvant toujours en position interne (figure 1). Cette courbure se fait selon un axe unique ce qui se traduit par une structure tubulaire creuse concentrique ou en rouleau allongé selon cet axe. Cette structure est caractéristique du chrysotile et lui confère ses propriétés asbestiformes (Wicks & Whittaker, 1975 ; Veblen & Wylie, 1993). Les substitutions chimiques semblent limitées bien que Ristic *et al.* (2011) ont montré la présence de substitution Fe^{2+} , Fe^{3+} et *al* en place du Mg et du Si dans des chrysotiles asbestiformes de différentes origines.

L'antigorite se présente comme un feuillet ondulé selon une direction axiale (figure 1). Cette ondulation est due à l'alternance périodique de la chaîne tétraédrique de part et d'autre de la chaîne octaédrique qui, elle, est continue et ondulée selon une direction (Capitani & Mellini, 2004, 2006 ; Palacios-Lidon *et al.*, 2010). Cet agencement en tôle ondulée stabilise la structure. Macroscopiquement, les occurrences d'antigorite présentent un habitus variable, massif, aciculaire, aplati ou pseudo-fibreux (Clinkenbeard *et al.*, 2002). Des variations de compositions chimiques par substitution de Fe^{2+} et *al* sont rapportées par Uehara & Shirozu (1985). Des variétés fibreuses d'antigorite sont rapportées depuis les travaux de Nagy (1953), Kunze (1956, 1958), Zussman *et al.* (1957), Montoya & Baur (1963) ; Coats (1968), Viti & Mellini (1996) et plus récemment par Groppo & Compagnoni (2007), Keeling *et al.* (2006, 2008 et 2010) et Fitz Gerald *et al.* (2010), Pugnali *et al.* (2010).

4.2 Occurrence de l'antigorite

L'antigorite n'appartient pas au groupe des amiantes mais plusieurs auteurs ont souligné le caractère parfois asbestiforme des cristaux d'antigorite (Udovkina *et al.*, 1987 ; Keeling *et al.*, 2008 ; Fitz Gerald *et al.*, 2010). D'autres auteurs parlent plus volontiers d'antigorite fibreuse, sans pour autant qualifier sa morphologie d'asbestiforme (Groppo et Compagnoni, 2007).

Des occurrences « d'antigorite asbestiforme » sont signalées près de Rowland Flat, dans le sud de l'Australie (Keeling *et al.*, 2006, 2008 ; Fitz Gerald *et al.*, 2010). La morphologie dominante de l'antigorite de Rowland Flat correspond à des lattes à bords biseautés lorsque les particules sont relativement bien préservées mais cette morphologie peut évoluer très rapidement en aiguilles très fines, beaucoup d'entre elles présentant une largeur inférieure à $0,1 \mu m$ (Fitz Gerald *et al.*, 2010).

Le caractère asbestiforme de l'antigorite de Rowland Flat, caractérisée par des lattes très allongées dans la direction [010], semble résulter du découpage des lattes en petits domaines séparés les uns des autres par des limites correspondant à autant de défauts cristallins et constituant des zones de faible résistance. Le long de ces limites internes, les lattes d'antigorite évoluent en fibres aplaties beaucoup plus fines, caractérisées par des largeurs très faibles puisque comprises entre 20 nm et 10 µm. Fitz Gerald *et al.* (2010) soulignent, que dans les échantillons très fracturés, ces fibres peuvent se séparer facilement les unes des autres. Un autre point particulier aux antigorites de Rowland Flat serait qu'elles proviendraient du remplacement de cristaux de trémolite fibreux dans le cadre d'un processus de dilatation « dilatant process » associé à des circulations importantes de fluides. Le caractère asbestiforme de l'antigorite serait donc ici, du moins pour partie, hérité de la structure fibreuse d'une trémolite préexistante.

Des veines à antigorite ont été décrites dans les serpentinites de l'île d'Elbe par Viti et Mellini (1996). Constituées par des lattes d'antigorite disposées parallèlement aux limites de veines enveloppant des corps massifs de serpentinites sombres. Les auteurs ont décrit, de part et d'autre des veines, des réactions impliquant le remplacement de la texture matricielle maillée, à lizardite et chrysotile, par de l'antigorite. Au sein des veines, les analyses en microscopie électronique ont montré que des fibres de chrysotile (et de serpentine polygonale) étaient fréquemment associées aux lattes d'antigorite, les fibres de chrysotile présentant un tube central plus grand et des parois plus fines par rapport aux fibres de chrysotile « classiques ».

Dans les serpentinites du massif de Lanzo, Groppo et Compagnoni (2007) ont décrit la présence de veines d'antigorite fibreuse de 1 à 20 cm d'épaisseur. Ils signalent que les cristaux d'antigorite, d'apparence rigide dans les échantillons sains, présentent une morphologie plus franchement fibreuse sur les surfaces des particules altérées.

Des occurrences d'antigorite sont également décrites par Ribeiro da Costa *et al.* (2008) dans des serpentinites prélevées dans des zones de faille de la ride médio-atlantique. Les analyses réalisées à partir de ces antigorites cristallisées en contexte océanique suggèrent qu'elles proviennent du remplacement du chrysotile par un processus de dissolution-recristallisation plutôt que par une transition à l'état solide. Ce processus de dissolution-recristallisation aurait été favorisé par l'intensité des déformations subies par ces serpentinites, à des températures inférieures à 300°C.

4.3 Distinction et stabilité respectives des serpentines

La distinction entre les trois espèces minérales les plus abondantes des serpentines se fait à l'échelle microscopique et l'utilisation de la microscopie électronique à transmission couplée à un analyseur élémentaire (MET Analytique) est le moyen le plus adéquat pour définir l'une ou l'autre des espèces au niveau cristallographique et les éventuelles substitutions chimiques. Cependant cette méthode est lourde et n'était que très partiellement utilisée jusqu'à maintenant même si son usage se fait plus fréquent. Suite aux travaux sur les amiantes (Lewis *et al.*, 1996 ; Bard *et al.*, 1997) et plus particulièrement sur les chrysotiles (Kloprogge *et al.*, 1999) la spectroscopie Raman à transformée de Fourier (FT Raman) s'est révélée comme une méthode pratique simple et rapide. Pasteris & Wopenka (1987) furent les premiers à utiliser cette technique pour essayer de distinguer les trois types de serpentine. Rinaudo *et al.* (2003) posèrent les critères de distinction entre chrysotile, antigorite et lizardite par FT Raman qui est à l'heure actuelle la technique de prédilection (Groppo *et al.*, 2006; Ulrich 2010). La distinction qualitative et quantitative entre les trois serpentines dans un échantillon de serpentine peut également s'effectuer par analyse thermo différentielle (DTA) selon Viti (2010) et Viti *et al.* (2011).

La lizardite est la plus abondante des serpentines, suivie par l'antigorite et en dernier lieu le chrysotile. Les serpentinites se forment par hydratation à pression (P) et à température (T) décroissantes des minéraux tels qu'olivines, pyroxènes et amphiboles des roches basiques ou

ultrabasiques (Coleman, 1971). On parle de serpentinitisation dans un contexte de métamorphisme rétrograde¹² ou d'hydrothermalisme¹³. A l'inverse, on parle de dé-serpentinitisation lorsque la transformation à T et P croissants intéresse une roche serpentinitisée. Cette transformation dite de métamorphisme prograde conduit à la néoformation des minéraux de hautes T et P que sont olivines, pyroxènes et amphiboles. Il est communément admis que dans les serpentinites de métamorphisme prograde, l'antigorite est le minéral dominant (Debret *et al*, 2013; Evans & Tromsdorff, 1978; Groppo & Compagnoni, 2007 ; Schwartz *et al*, 2013). Ceci est par ailleurs confirmé expérimentalement (Padron-Navarta *et al*, 2010; Reynard et Wunder, 2006 ; Wunder *et al*, 1997 ; 2001). Lizardite et chrysotile sont les minéraux dominants présents dans les serpentinites de basses T et P (Andréani *et al*, 2007; Evans, 2004). Cependant les transitions entre métamorphisme basse condition et métamorphisme haute condition ne sont pas très documentées. Les données thermodynamiques prédisent que l'antigorite est plus stable que la lizardite au-dessus de 300°C, leurs champs de stabilité respectifs se superposant entre 30 et 300°C alors que le chrysotile est métastable (Evans, 2004). La transition antigorite-lizardite semble dépendre essentiellement de T et du degré d'hydratation plutôt que de P (Evans *et al*, 2013). Bien plus, l'antigorite est très souvent observée dans des échantillons de plus hautes T et P alors que le chrysotile est particulièrement abondant dans des serpentinites rétrogrades (Baronnet et Bellusso, 2002). Récemment, Schwarch *et al*. (2013) ont montré qu'en dessous de 320°C, seuls la lizardite et le chrysotile sont stables. Entre 320 et 390°C, la lizardite et l'antigorite coexistent, l'antigorite se développant au dépend des cristaux de lizardite à T croissant. Au-delà de 390°C seul l'antigorite est stable et au-dessus de 460°C, elle se déstabilise au profit de l'olivine.

4.4 L'antigorite en Nouvelle-Calédonie

L'archipel de Nouvelle-Calédonie est d'un point de vue géologique une structure géodynamique complexe formée à la limite du domaine continental australien et du domaine océanique du Pacifique (Pelletier *et al*, 2012, Maurizot et Vendé-Leclerc, 2012). Les terres émergées calédoniennes se répartissent d'une part sur la ride des Loyauté (Iles de Maré, Tiga, Lifou, Ouvéa et Beautemps-Beaupré) et la ride de Norfolk (Ile des Pins, Grande Terre, Belep). Des serpentinites plus ou moins massives se sont mises en place tout au long de l'histoire géologique de la Grande Terre. Elles sont liées à différents cycles géodynamiques successifs. Ainsi, Maurizot et Vendé-Leclerc (2012) soulignent la présence de serpentinites dans les unités¹⁴ de type Koh et de la Boghen (cycle anté-sénonien, 300-100 Ma), les unités de Poya et les unités du complexe métamorphique BT-HP de Pouébo et du Diahot-Panié (cycle calédonien 100-24 Ma). C'est également au cours de ce cycle calédonien que se met en place sur la ride de Norfolk la nappe de péridotite dont la base est soulignée par la présence de serpentinites dites « de la semelle ». Au-delà de ces serpentinites au sens strict, les processus de serpentinitisation (dé-serpentinitisation ?) qui affectent de manière plus ou moins intense les différentes roches et notamment les péridotites des massifs miniers et les roches du complexe métamorphique BT-HP donnent lieu à des occurrences plus ou moins localisées de serpentines.

Suite aux travaux de Baumann (2007a et b), Lahondère (2007), Wernert (2007), Record (2008) et la mission du BRGM-LEPI-INSERM (2007), la DIMENC-SGNC & BRGM (2011) ont dressé une cartographie des terrains potentiellement amiantifères et proposé un certain nombre de

¹² Le métamorphisme est une transformation d'une roche à l'état solide du fait d'une élévation de température et de pression. Il est dit rétrograde lorsque la transformation correspond à une diminution de pression et température d'une roche métamorphique initiale (Foucault & Raoult, 2010)

¹³ Transformation induite par des circulations d'eaux chaudes (100-400°C) et sous pression (Foucault & Raoult, 2010)

¹⁴ Terme désignant tout ensemble structuré de terrains géologiques que l'on peut individualiser pour des raisons tectoniques et/ou stratigraphiques (Foucault & Raoult, 2010)

préconisations visant à limiter les émissions de fibres (Lahondère & Maurizot, 2009 ; Maton & Maurizot, 2009). Jusqu'à présent très peu mentionnées (Montoya & Baur, 1963 ; Pelletier, 2006 ; Robineau, 2006), les occurrences d'antigorite se révèlent désormais être relativement plus fréquentes (Houchot, 2008 ; Boulmier, 2009 ; Lahondère *et al*, 2011, 2012) que supposées.

Des occurrences à antigorite sont ainsi connues dans trois unités géologiques (Diahot, Boghen, Nappe des péridotites) (Voir en annexe 3, la cartographie des terrains potentiellement amiantifères qui figure dans l'arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010).

Dans l'unité du Diahot, des veines d'antigorite ont été observées dans les serpentinites. Parfois longues de plusieurs mètres, ces veines recourent les serpentinites. Elles sont caractérisées par des cristallisations sub-perpendiculaires aux épontes, en gerbes étroites à texture fibro-radiée.

Dans la nappe des péridotites, les occurrences d'antigorite les plus importantes correspondent aux plans à antigorite bien connus des mineurs (Photo 1).



Photo1 : Veine d'antigorite altérée, Presqu'île de Bogota, Nouvelle-Calédonie (© BRGM – Didier Lahondère).

Qualifiées de plans de mouvement à cristallisations fibro-lamellaires (Lahondère et Maurizot, 2009 ; Lahondère *et al*, 2011), ces occurrences sont largement répandues dans les péridotites. Ces plans se suivent en général sur de très grandes longueurs et portent des cristallisations parfois très longues (plusieurs dizaines de centimètre). L'épaisseur de ces plans varie de quelques millimètres à quelques décimètres. Les analyses effectuées à partir d'échantillons prélevés dans la nappe des péridotites montrent que ces plans sont constitués par une association entre une serpentine lamellaire (antigorite) et du chrysotile (Lahondère et Maurizot, 2009 ; Lahondère *et al*. 2011). En fonction de l'échantillon considéré, le chrysotile peut être plus ou moins abondant, voire absent (ou non détecté à l'analyse).

Soumis à l'altération, ces plans de mouvement à cristallisations fibro-lamellaires se désagrègent en un matériau blanchâtre constitué par un mélange de fibres très fines et de fragments rigides correspondant à des lamelles de serpentine (« amas fibro-lamellaires ») (Photo 2). Dès 2006, Pelletier a fait part de ses observations relatives à l'altération de ces plans à antigorite, altération qualifiée de supergène, qui donne un produit blanc d'aspect argileux assez semblable au pö trémolitique. Pour ce même auteur, « l'antigorite se rencontre en minces placages dans certains miroirs de failles... ..et se reconnaît alors par l'aspect de ses cristallisations en fines lattes rigides et cassantes qui soulignent les plans de fracture ». De ses observations, Pelletier (2006) tire un principe de précaution mentionnant qu'il « convient cependant de prendre toutes les dispositions utiles pour éviter d'avoir des fibres d'antigorite dans les poussières des pistes, sachant que seule l'antigorite très altérée est susceptible de libérer une grande quantité de fibres potentiellement inhalables (fibres de moins de 10 à 20 microns de long) ».



Photo 2 : Amas fibreux d'antigorite altérée, Presqu'île de Bogota, Nouvelle-Calédonie (© BRGM – Didier Lahondère).

En 2010, Boulmier présente un rapport relatif à l'examen d'un échantillon d'antigorite prismatique altérée à l'état brut et après un broyage ménagé (Boulmier, 2010). L'échantillon provient d'un chantier d'aménagement situé au pied du massif du Koniambo. Les images obtenues au MEB montrent clairement que l'échantillon brut présente un habitus prismatique pouvant être confondu, à l'œil nu, avec un habitus fibreux. Cette antigorite se délite en lattes, produisant des particules irrégulières à bords non parallèles. Après un broyage ménagé, ce même échantillon apparaît constitué par des fragments fibriformes (longueur/diamètre > 3) présentant toujours des formes

irrégulières et des bords non parallèles. Malgré le caractère ménagé du broyage, ces fragments ont une granulométrie très fine, caractérisée par des diamètres le plus souvent inférieurs à 3 µm. Dans le même rapport, Boulmier conclut en écrivant que « ...la majorité des particules produites par un broyage ménagé possède les caractéristiques granulométriques ($L/D > 3$, $D < 3 \mu\text{m}$, $L > 5\mu\text{m}$). Elles seraient comptabilisées suivant les critères de la norme AFNOR NF X 43-269. Leur forme répond aussi aux critères morphométriques de la norme NF X 43-050 et seraient donc prises en compte si cette norme était étendue à l'antigorite. ». Plusieurs analyses réalisées depuis ont permis de confirmer la présence de particules fibriformes très fines dans les amas issus de l'altération et de l'érosion des plans à antigorite (Photo 3).



Photo 3 Structure à antigorite altérée et image MEB correspondante, Massif de Vulcain, Nouvelle-Calédonie (d'après Lahondère *et al*, 2012).

En 2011, une étude relativement exhaustive incluant les principaux massifs miniers a permis de montrer que des structures à antigorite étaient presque toujours présentes. L'abondance de ces structures et la densité du réseau serpentineux qu'elles forment entre-elles varient cependant d'une zone à l'autre d'un même massif, parfois très rapidement (sur quelques mètres). Les observations réalisées en microscopie électronique à transmission ont montré que les particules fibreuses d'antigorite possédaient des caractéristiques morphologiques différentes de celles qui caractérisent les fibres d'amiante. En particulier, les bords des fibres observées sont rarement parallèles et les fibres les plus fines n'apparaissent jamais souples (Lahondère *et al*, 2011).

En 2012, les travaux réalisés dans le cadre GIP CNRT (Lahondère *et al*, 2012) ont conduit à l'identification de plans porteurs de cristallisations asbestiformes de trémolite et/ou d'anthophyllite au niveau des épontes entre les péridotites et les filons basiques (amphibolites de la presqu'île de Bogota, filons basiques du col de Ngo et de Saint-Gabriel) (Photos 4 et 5).



Photo 4 : Faisceau de trémolite-amiante, Massif du Sud, Nouvelle-Calédonie (© BRGM – Didier Lahondère).



Photo 5 : Faisceau d'anthophyllite-amiante, Presqu'île de Bogota, Nouvelle-Calédonie (© BRGM – Didier Lahondère).

Dans le cadre de la même étude, des associations à serpentine fibreuse + trémolite-amiante ont également été reconnues en plusieurs points de la nappe des péridotites, notamment dans le massif de Poro et dans le secteur de Gio. Ces associations ont fait l'objet d'analyses spécifiques par FT Raman et les résultats montrent que la serpentine associée à la trémolite est toujours l'antigorite. Ces résultats permettent de conforter les observations faites sur le terrain relatives à l'imbrication très étroite entre les plans porteurs de trémolite-amiante et les veines fibro-lamellaires à antigorite. La contemporanéité de ces cristallisations explique pourquoi ces phases minérales ont parfois été identifiées dans les mêmes sites microstructuraux.

Au final, s'agissant de la Nappe des péridotites de Nouvelle-Calédonie, il apparaît :

- que des veinules à chrysotile sont fréquemment présentes de part et d'autre des plans à antigorite ;
- que des veinules à chrysotile recoupent parfois les plans à antigorite ;
- que des assemblages à trémolite-amiante + antigorite existent ;
- que des plans porteurs de cristallisations de trémolite-amiante ou d'anthophyllite-amiante sont localement abondants, associés à l'échelle de l'affleurement aux plans de mouvement à antigorite.

Dès lors, il peut apparaître logique de considérer les plans de mouvement à cristallisations fibro-lamellaires d'antigorite comme des structures amiantifères ou à fort potentiel amiantifère et de les traiter comme telles dans le cadre des travaux miniers.

L'association étroite, à l'échelle du terrain ou de l'échantillon, entre antigorite et chrysotile n'est pas propre aux péridotites plus ou moins serpentinisées de Nouvelle-Calédonie. Dans les péridotites plus ou moins serpentinisées du Massif de Lanzo, dans les Alpes occidentales, la formation des veines à antigorite fibreuse prédate le développement des veines à chrysotile, dans le cadre d'un processus de décompression (Compagnoni *et al*, 1980 ; Groppo et Compagnoni, 2007). Dans les serpentinites de l'île d'Elbe, du chrysotile est associé aux veines à antigorite (Viti et Mellini, 1996).

Points clés :

- La distinction entre les trois principaux minéraux des serpentines (lizardite, chrysotile, antigorite) et la détermination de leurs caractéristiques dimensionnelles sont obtenues de manière univoque par l'utilisation de deux méthodes complémentaires, la spectrométrie Raman (FT Raman) et la microscopie électronique à transmission (MET).
- Les occurrences d'antigorite se révèlent être nombreuses en Nouvelle-Calédonie, dans les trois unités géologiques du Diahot, de la Boghen et de la Nappe des péridotites, cette dernière couvrant à elle-seule 1/3 de la surface de la Grande Terre.
- Les occurrences d'antigorite sont étroitement associées depuis l'échelle de l'affleurement jusqu'à celle de l'échantillon à des occurrences à chrysotile, trémolite-amiante et anthophyllite-amiante.
- L'altération des occurrences d'antigorite conduit à la formation d'amas fibro-lamellaires constitués de particules fibriformes hétérométriques issues de la fragmentation des lames originelles.
- Les particules issues de l'altération et de la fragmentation des lames d'antigorite correspondent à des particules de type « fragment de clivage » dont une part au moins présente des caractéristiques dimensionnelles qui sont celles des fibres inhalables au sens de l'OMS.

5 Effets sanitaires de l'antigorite

5.1 Données expérimentales

Il existe très peu de publications relatives à la toxicité de l'antigorite.

Dans quelques études *in vitro* relativement anciennes, et provenant de la même équipe de l'université de Vermont (Etats-Unis), l'antigorite a été testée en comparaison avec des fibres asbestiformes dont l'effet cancérigène était déjà admis (essentiellement le chrysotile et la crocidolite).

Plus récemment, seules deux études portant spécifiquement sur les effets « *in vitro* » de l'antigorite ont été recensées.

Une seule étude *in vivo*, datant de 1993, a été retrouvée. Il s'agit d'une étude par injection péritonéale d'un mélange de fibres contenant de l'antigorite

5.1.1 Études « *in vitro* »

Étude de Woodworth et al (1983)

Les auteurs utilisent un modèle cellulaire dans lequel des cultures d'explants de trachée peuvent être maintenues pendant plusieurs semaines dans un état différencié. Ils ont testé sur ce modèle le chrysotile et la crocidolite d'une part, et leurs homologues non fibreux (antigorite et riébeckite) d'autre part. Dans le premier cas, ils ont observé une métaplasie squameuse, qui est selon les auteurs, une lésion réversible mais souvent précancéreuse ainsi qu'une augmentation de la synthèse d'ADN. Dans le deuxième cas, les auteurs indiquent que les analogues non fibreux (antigorite et riébeckite) n'induisent pas ces effets en comparaison des contrôles constitués d'explants non exposés, et ce dans les mêmes conditions expérimentales (temps et durée d'exposition). Ils concluent en indiquant que ces données mettent en évidence l'importance de la forme fibreuse, la croissance cristalline en longueur et le rapport longueur sur diamètre dans la bioréactivité des fibres.

Étude de Marsh et Moosman (1988)

Dans cet essai, des préparations de chrysotile et de crocidolite d'une part, et d'antigorite et de riébeckite d'autre part, ont été testées sur des cultures cellulaires épithéliales de trachée de hamster, pour évaluer leur capacité à induire l'ornithine décarboxylase, qui est une enzyme associée à la prolifération cellulaire et à la promotion tumorale dans des modèles cutanés de souris. Les auteurs indiquent que les fibres asbestiformes induisent de façon significative l'ornithine décarboxylase, contrairement à l'antigorite et à la riébeckite qui ne sont pas actives pour cet effet.

Étude de Sesko et Moosman (1989)

L'antigorite et la riébeckite étaient actives, mais beaucoup plus faiblement que le chrysotile et la crocidolite, dans la stimulation de la survie ou de la prolifération de cellules épithéliales trachéales de hamster, lors d'un essai de formation de colonies (colony-forming assay). Dans cet essai, les cellules sont incubées soit à court terme (2 à 24h), soit à long terme (>24h) et la prolifération cellulaire est mesurée par le taux d'incorporation de ³HThymidine. La concentration d'antigorite produisant un effet comparable à ceux obtenus avec le chrysotile et la crocidolite est d'environ 10 fois plus élevée.

Étude de Moosman et Sesko (1990)

Dans cet essai, les auteurs ont testé plusieurs minéraux fibreux et non fibreux sur des cellules épithéliales trachéales de hamster, pour leur capacité à induire une libération de ⁵¹Chrome. Ils montrent que le chrysotile et la crocidolite ont un effet significatif en comparaison des cellules

témoins (non exposés), alors que l'antigorite et la riébeckite ne montrent aucune différence d'effet avec les cellules témoins.

Étude de Cardile et al (2007)

Ces auteurs indiquent avoir évalué les effets de fibres d'antigorite sur des cellules mésothéliales non malignes MeT-5-A d'une part, et sur des monocytes de souris J774, lignée de macrophages comparables dans les études de cytotoxicité avec des macrophages alvéolaires, d'autre part.

Ils précisent que l'antigorite utilisée est de nature fibreuse et est extraite de roches de serpentine provenant de la région de Saint Jacques en Italie. Les fibres ont été caractérisées par plusieurs techniques (diffractométrie des rayons X, microscopie électronique et caractéristiques chimiques) qui permettent de dire que leurs diverses propriétés sont conformes à celles de l'antigorite « fibreuse ».

Les deux types de cellules ont été exposés à des concentrations variant de 5 à 500 µg/ml (selon les tests réalisés) de fibres d'antigorite pendant 72 heures. Les mêmes essais sont réalisés avec la crocidolite comme témoin positif. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus avec des cellules contrôles négatifs (témoins non exposés). Les effets mesurés concernent le pourcentage de viabilité cellulaire, la libération de lactate déshydrogénase, la production d'EADO et d'EADN et la génération du PGE2.

Les auteurs indiquent que les effets obtenus avec l'antigorite sont, pour tous les paramètres, inférieurs à ceux obtenus avec la crocidolite, tout en étant significativement plus élevés avec ceux des témoins négatifs (non exposés)

Étude de Pugnali et al (2010)

Les auteurs indiquent avoir testé des fibres d'antigorite « asbestiforme » sur des cellules épithéliales alvéolaires humaines cancéreuses A549.

Les fibres ont été isolées à partir de roches serpentiniques des Alpes italiennes et caractérisées par microscopie électronique, diffractométrie et spectrométrie.

- Les auteurs ont utilisé une concentration de 50 µg/ml d'antigorite pendant 24h ou 48h. La viabilité cellulaire est mesurée par la mesure de l'activité de la succinate déshydrogénase mitochondriale sur les cellules traitées et les cellules témoins. Le résultat montre une baisse de 46% (incubation de 24h) et de 90.7% (incubation de 48h) pour les cellules traitées par rapport aux cellules témoins.
- Les observations au microscope des cellules traitées montrent une distribution irrégulière des filaments d'actine (que les auteurs indiquent être due au contact de l'antigorite). Ils précisent que les cellules apparaissent isolées et faiblement agrégées entre elles. Le nombre de cellules apoptiques augmenterait de 15% (exposition de 24h) à 20% (exposition de 48h).
- Les autres effets rapportés sont une augmentation de la synthèse de VEGF, de Cdc42, et de caténine.

Synthèse des études in vitro :

Les 4 premières études (Woodworth et Mossman (1983) ; Marsh et Mossman (1988) ; Sesko et Mossman (1989) ; Mossman et Sesko (1990)) , toutes réalisées par la même équipe, utilisant les mêmes sources d'échantillons et les mêmes techniques de préparations, s'intéressent à l'antigorite non fibreuse (< 3% de formes fibreuses). Ces études seraient en faveur d'une absence d'effet de l'antigorite non fibreuse sur les signaux promoteurs de tumeurs ou plus globalement de prolifération cellulaire. Une cytotoxicité pourrait survenir à forte dose, mais les résultats des différentes études sont discordants sur ce point.

Les deux études italiennes (Cardile et al (2007) ; et Pugnali et al (2010)) traitent de l'antigorite fibreuse, susceptible de contenir des traces de chrysotile (<3%). Elles seraient en faveur d'une cytotoxicité, prédominante à forte dose, réelle bien que moindre que celle de la crocidolite. Seule

l'étude de Cardile fournit des données en faveur de la production d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote, voire d'interférences avec les mécanismes apoptotiques.

Les protocoles, les doses, les temps de contact, les cellules utilisées étant différents (ou la comparaison étant irréalisable) entre les études relatives à l'antigorite fibreuse et non fibreuse, il n'est cependant pas possible de comparer, sur la base de ces publications, la toxicité de ces deux formes minérales. Il est également difficile d'affirmer ou d'infirmer une toxicité spécifique de l'antigorite. Les 2 études réalisées sur les formes fibreuses d'antigorite semblent en faveur d'effets cytotoxiques, notamment à forte dose. Du fait des dimensions des fibres utilisées (14 à 20µm de long pour un diamètre faible, de 0,08 à 0,4 µm), ces résultats sont cohérents avec les données de la littérature sur les fibres minérales ayant ces dimensions (« effet fibre »), qui seront développées plus loin. En outre, l'étude de Sesko (1989), qui compare l'antigorite avec d'autres minéraux, silicatés ou non, fibreux ou non, pourrait fournir un argument en faveur de l'influence de la composition des fibres sur leur toxicité, indépendamment du paramètre dimensionnel.

Néanmoins, ces différents points ne permettent pas de conclure sur le potentiel toxique des diverses formes d'antigorite, d'autant que s'agissant d'études *in vitro*, les phénomènes de solubilisation en milieu biologique, de clairance chimique et physique, donc plus globalement de biopersistance, ne peuvent être pris en compte.

Le tableau 3 résume les données des études de toxicité *in vitro* sur l'antigorite.

Tableau 3: Synthèse des études de toxicité *in vitro* ayant mis en œuvre l'antigorite sous ses diverses présentations morphologiques.

Référence	Définition des fibres			Protocole			Résultats (concernant uniquement l'antigorite)
	Identification	Dimensions	Méthode analytique	Substrat	Doses	Durée	
Woodworth et Mossman (1983)	Antigorite non fibreuse (<3% de formes fibreuses et « petites quantités de picrolite ¹ et de lizardite »)	Diamètre des particules : 47% < 0,2 µm 46% entre 0,2 et 1 µm 7% entre 1 et 3 µm	Pureté : diffraction aux RX Distribution des tailles : MEB ² Diamètre : technique de Cadle (1965)	Explants trachéaux de hamsters syriens mâles de 6 à 10 semaines	2 ml d'une solution de HBSS de concentration 1,0 ; 4,0 et 16,0 mg particules/ml Homogénéisation préalable à l'application par sonication	Temps de contact : 1h 12 explants par dose examen des cultures après 2, 4 et 6 semaines duplication de chaque test	Absence de métaplasie squameuse et de radiomarquage nucléaire (labelling index) quelque soit la dose et la durée d'observation
Marsh et Mossman (1988)				Monocouche de cellules épithéliales trachéales de hamster syrien doré nouveau-né	Dilution dans HBSS 2,9 µg/cm ² pour un test de cytotoxicité 0,325 et 0,65 µg/cm ² Homogénéisation préalable à l'application par sonication	Temps de contact : 24h	Absence de cytotoxicité (pas d'incorporation de méthionine marquée) Absence de promotion tumorale (pas d'élévation de l'Ornithine décarboxylase)
Sesko et Mossman (1989)				Cellules épithéliales trachéales de hamster syrien doré nouveau-né femelle	Homogénéisation préalable à l'application par sonication	7j pour un CFE ³ assay	Effet toxique (baisse des colonies cellulaires survivantes) à forte dose dans un milieu à 10% de sérum bovin fœtal Effet prolifératif à faible dose (CFE>100%) puis toxique à forte dose dans un milieu à 2% de sérum bovin fœtal

Mossman et Sesko (1990)				Macrophages alvéolaires obtenus par lavage bronchoalvéolaires de rats mâles Fischer 344	0,01 à 20 µg/cm ² (0,01 ; 0,05 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 5 ; 10 ; 20)	Temps de contact 3h (texte) ou 24h (figure) ? 4 individus par dose. 3 expériences	Absence de cytotoxicité (relargage de ⁵¹ Cr) à toutes les doses dans un milieu à 2% de sérum bovin foetal
Référence	Définition des fibres			Protocole			Résultats (concernant uniquement l'antigorite)
	Identification	Dimensions	Méthode analytique	Substrat	Doses	Durée	
Cardile <i>et al</i> (2007)	Antigorite « fibreuse »	Longueur : 14 à 20µm Épaisseur : 0,08 à 0,4µm	Dimensions : diffraction aux RX et MEB Identification fine par META, diffraction et cristallographie électronique	Cellules mésothéliales non-malignes MeT-5A Macrophages de souris J774	5, 50 et 100 µg/ml, soient 1923, 19231 et 38461 fibres /ml	Temps de contact : 72h	Cytotoxicité dose dépendante (deux fois moindre que la crocidolite) sur les deux types cellulaires, plus intense sur J774 Viabilité cellulaire réduite de manière dose-dépendante Élévation dose-dépendante des EADO et EADN dans les cellules MeT-5A, et seulement à forte dose dans les J774 Induction dose-dépendante de la PGE2 ⁴ dans les cellules MeT-5A
Pugnali <i>et al</i> (2010)	Antigorite « asbestiforme » (<3% de chrysotile et lizardite) Oxyde de fer : 1,68%			Cellules malignes humaines A549 (caractéristiques communes avec des cellules épithéliales alvéolaires)	50 µg/ml (38461 fibres/ml)		Temps de contact : 24 et 48h

1 : la picrolite est un nom désuet pour l'antigorite fibreuse

3: CFE = colony forming efficiency

2 : microscopie électronique à balayage

4: PGE2: prostaglandine E2

5.1.2 Étude « *in vivo* »

Description

Une seule étude (Wozniak *et al*, 1993) a été retrouvée. Les auteurs indiquent que cette étude fait suite au constat d'un cas de mésothéliome et de plusieurs cas d'asbestose relevés chez des travailleurs d'une usine de traitement de minerai. Ils précisent que le but de l'étude était de « mesurer l'activité mutagène et carcinogène de l'antigorite présente dans des mélanges bruts provenant de 10 gisements miniers de la région de Silésie ».

L'activité carcinogène a été évaluée sur des rats Wistar et sur des souris Balb C, après une injection péritonéale de 5 mg (pour les souris) et 20 mg (pour les rats) d'un mélange de minerai broyé, en suspension dans 1,2 ml de NaCl à 0,9%. Les animaux ne sont pas sacrifiés mais suivis jusqu'à leur décès. Deux autres lots de rats sont traités respectivement avec du chrysotile ou de la crocidolite. Les auteurs indiquent que tous les organes de tous les animaux décédés sont prélevés pour un « examen morphologique ».

L'activité mutagène *in vivo* est mesurée par la capacité des poussières minérales à induire des échanges de chromatides sœurs « sister chromatide exchanges » sur les cellules de la moelle osseuse. Dans cet essai, des souris Balb C mâles âgées de 8 à 10 semaines sont utilisées.

Les résultats sont résumés dans les deux tableaux suivants (extraits de la publication). Selon les auteurs, ils montrent que les mélanges induisent significativement plus de tumeurs (dont des mésothéliomes), par rapport aux témoins, et d'autant plus que leur teneur en antigorite est plus élevée.

Table 2. The percentage of rats with tumors and survival time to the first tumor

Group	Number of rats	Percentage of animals with tumors			Time to first tumors (days)		
		T.	MT.	M.	B.	MT.	M.
1. Dust from mineral mines:							
– nickel ore (I)	45	80	80	77.8	—	238	238
– serpentinite (II)	76	30.3	18.4	13.1	404	298	513
– serpentinite (III)	60	44.1	30.5	8.5	443	354	354
– magnesite (IV)	41	48.8	36.6	29.3	582	462	462
– magnesite (V)	57	31.6	22.8	3.5	472	415	415
– gabbro (VI)	27	44.4	14.8	3.7	611	558	889
– granite (VII)	25	28.0	16.0	4.0	776	655	760
– syenite (VIII)	31	35.5	12.9	3.2	713	99	791
– dolomite (IX)	39	28.2	15.4	5.1	497	440	440
– coal (X)	28	46.4	10.7	3.6	146	325	892
2. Control group							
– NaCl	78	33.3	14.1	0.0	150	252	—
– chrysotile UICC	30	23.2	6.7	3.3	452	404	404
– crocidolite UICC	31	74.2	74.2	70.9	585	294	294

T – total number of tumors

MT – number of malignant tumors

M – mesotheliomas

B – benign tumors

Table 3. Relationship between content of respirable fibres of antigorite in dust dose and Sister Chromatid Exchange (SCE) Frequency and number of mesothelioma in mice

Content of respirable fibres in the dust dose	Number of the mice with mesothelioma	SCE/cell X ± XSE
Control group – 0 Antigorite	0/29	4.66 ± 0.55
52.5 × 10 ⁶	9/32	8.55 ± 1.38 ^x
Control group – 0 Antigorite	0/29	3.95 ± 0.13
0.1 × 10 ⁶	1/28	4.50 ± 0.33

X – arithmetic mean

SE – standard error

x – statistically significant (p < 0.01)

Analyse critique

Les échantillons testés dans cette étude présentent en réalité une composition complexe. Ainsi, seuls les échantillons provenant de 5 gisements sur 10 contiennent de l'antigorite. Ces échantillons contiennent d'autres fibres et/ou d'autres particules dont la toxicité, voire la cancérogénicité est potentiellement reconnue. Ainsi, 4 de ces échantillons contenant de l'antigorite, contiennent aussi:

- du quartz (dans 2 échantillons) ;
- une serpentine (sans précision de l'espèce minérale) (dans 1 échantillon) ;
- un échantillon contient de la dolomite, minéral sans effet pulmonaire avéré à ce jour, et dont la croissance linéaire en association avec des veines d'antigorite serait discutée.

Par ailleurs, la lecture de l'article ne permet pas d'affirmer que toutes les fibres observées sont bien des fibres d'antigorite, ou d'évaluer la part de l'antigorite dans l'ensemble des fibres décomptées. Il est donc difficile d'attribuer spécifiquement les effets observés à l'antigorite fibreuse. Enfin, même s'il semble exister une tendance de relation «dose-réponse» entre le nombre de tumeurs et la quantité de fibres des échantillons contenant de l'antigorite, une relation similaire est également observable avec les échantillons ne contenant pas d'antigorite, ce qui serait dans ce cas en faveur d'un « effet fibre » plus que d'un « effet antigorite ».

5.2 Données épidémiologiques

Les études épidémiologiques explorant les effets sanitaires de l'antigorite chez l'Homme sont quasiment inexistantes. La rareté des études peut s'expliquer par le fait que l'antigorite n'est pas exploitée industriellement. Il faut donc un contexte environnemental particulier pour que se pose le problème de ses effets. En fait, les deux seules publications disponibles ont été réalisées sur la population de Nouvelle-Calédonie. Elles portent sur les liens pouvant exister entre la survenue de mésothéliomes et différents facteurs de risque environnementaux dont l'exposition à l'antigorite (pour la deuxième publication uniquement).

Les résultats de ces travaux sont rapportés dans une thèse (Baumann, 2010) et dans trois publications (Baumann *et al*, 2007a et b ; Baumann *et al*, 2011)

Précédemment à ces travaux, des chercheurs de l'INSERM avaient étudié l'incidence des mésothéliomes et des cancers respiratoires en Nouvelle-Calédonie (Goldberg *et al* 1991) et leurs liens éventuels avec l'exposition à la trémolite amiante (Goldberg *et al*, 1994 et Luce *et al*, 2000).

5.2.1 Incidence du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie

La Nouvelle-Calédonie dispose d'un enregistrement des cancers depuis 1977. La gestion de ce registre a été confiée à l'Institut Pasteur en 1995.

Une étude de P. Goldberg (1991) présente les premières données concernant le mésothéliome dans la période de 1978 à 1987. Douze cas, certifiés par un comité français d'experts pneumologues, ou par le comité national du Mésothéliome, sont observés dans cette période. Parmi ces 12 cas :

- 3 femmes et 9 hommes ;
- 9 mélanésiens, 2 caucasiens et 1 asiatique.

Onze cas supplémentaires sont suspectés. Le nombre moyen annuel de mésothéliomes est de 1,2 (2,3 si l'on rajoute les cas seulement suspectés). Une comparaison de l'incidence du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie avec celle d'autres registres français (Bas-Rhin et Doubs), anglo-saxons (New-York et d'Angleterre-Pays de Galles) ou de la région pacifique (Nouvelles Galles du Sud en Australie) a été réalisée : l'incidence du mésothéliome, pour les seuls cas certifiés, est 2 à 5 fois plus élevée en Nouvelle-Calédonie que dans les régions couvertes par les registres.

Dans la période suivante, 1989-2003, le nombre de cas de cancer, toutes localisations confondues, enregistrés dans le registre est en moyenne de 407 par an (Baumann *et al*, 2005). Les cancers féminins les plus fréquents sont ceux du sein, de l'utérus, des ovaires et de la thyroïde. Chez les hommes prédominent les cancers du poumon, les cancers digestifs, ceux de la prostate, et des testicules.

Cette analyse fait état d'un nombre moyen de mésothéliomes par an de 4,1 chez les hommes et de 3,6 chez les femmes. L'incidence (standardisée sur l'âge en prenant comme taux de référence ceux de la population mondiale) est respectivement de 5,1 pour 100 000 chez les hommes et de 4,4 chez les femmes. Les taux sont du même ordre de grandeur pour les deux sexes et suggèrent donc une probable cause environnementale. L'incidence est 3 fois plus élevée que dans le reste du monde pour les hommes (5.1 pour 1,7) et 20 fois plus élevée pour les femmes (4.4 pour 0,2).

L'analyse par région montre de fortes disparités : le mésothéliome est 3 à 5 fois plus incident dans la province du Nord que dans les autres provinces (hommes : 10,8 pour 100 000, femmes : 12,2 pour 100 000).

5.2.2 Étude sur les facteurs de risque du mésothéliome (2007)

L'objectif de cette étude (Baumann *et al*, 2007b) était de vérifier si le Pö, enduit à base de terre locale utilisé comme revêtement sur les maisons était la seule cause des cas de mésothéliome observés dans l'île. En effet, une étude de D. Luce *et al* (2000) montrait l'implication de ce revêtement dans la survenue des cas.

Les personnes diagnostiquées comme porteuses d'une tumeur pleurale maligne enregistrées dans le registre des cancers de Nouvelle-Calédonie entre 1984 et 2002 étaient au nombre de 89. Les 68 cas pour lesquels le diagnostic était confirmé par l'histologie ont été retenus pour l'étude. En cas de doute, le cas était soumis au réseau de spécialistes anatomopathologistes français "Mesopath". Les témoins (deux par cas) ont été tirés au sort dans le registre des cancers (tous cancers sauf plèvre, péritoine et poumons) après appariement sur le sexe, l'âge et la date de diagnostic.

Les variables recueillies pour chaque personne étaient : le sexe, l'âge, le groupe ethnique, le lieu de résidence au moment du diagnostic, le type de cancer et la date de diagnostic. Les districts dont l'effectif d'habitants était < 1000 étaient agrégés au district voisin le plus proche.

Pour chaque district étaient recueillies les données suivantes : nombre de maisons couvertes de Pö enregistrées par les autorités provinciales (campagne de 1997), niveau (élevé ou faible) d'activité minière et estimation d'un degré d'amiante (« grade asbestos ») dans le sol faite à l'aide d'une carte géologique. Le critère utilisé était la présence de serpentinite à une distance inférieure à 5 km de l'ensemble des maisons du district (environ une heure de marche) ou de l'une ou

plusieurs des tribus habitant le district. Le degré était codé 0, 1, 2 ou 3 (0 = absence de serpentinite, 1 = serpentinite trouvée dans le sol à plus de 5 km des habitations, 2 = serpentinite trouvée à moins de 5 km d'au moins une tribu, 3 = serpentinite à une distance inférieure à 5 km pour plusieurs tribus du district).

Dans un premier temps, les cas et les témoins ont été comparés pour le groupe ethnique et le lieu de résidence. Ensuite une étude écologique a été réalisée : la méthode statistique a consisté à comparer les districts avec cas de mésothéliome (n=17) à ceux sans mésothéliome (n=15) par des régressions logistiques (étude de la variable qualitative « district avec ou sans mésothéliome ») ou des régressions linéaires (étude de la variable quantitative : « nombre de cas de mésothéliome par district »). Un cas est « attribué » au district où il habitait au moment du diagnostic.

Résultats de l'étude :

Les mélanésien constituent le groupe ethnique le plus touché : l'odds-ratio est de 16,18 (IC 95% = [5,68-49,64]) en prenant comme référence la population de type caucasien. Par rapport à Nouméa, ce sont les régions de Houailou (OR=119 ; 95% IC = [34-502]), Koné (OR= 52 ; 95% IC = [12-254]) et Touho (OR=33 ; 95% IC= [5-205]) qui présentent le plus de cas.

L'analyse écologique par régression linéaire montre une association significative (avec un risque d'erreur à 10%) entre l'existence de serpentinite dans le sol et le nombre de mésothéliomes dans les districts. C'est le seul facteur significatif. En revanche, l'analyse par régression logistique des facteurs de risque du mésothéliome ne montre aucune association significative. L'odds-ratio entre mésothéliome et revêtement de Pö est égal à 1,01 (IC 95% = [0,98-1,04]), celui correspondant à l'existence d'une activité minière à 0,84 (IC 95% = [0,24-2,90]). Toutefois, on observe une association à la limite de la significativité entre mésothéliome et sol contenant de la serpentinite (OR=2,49 ; IC 95% = [0,82-7,58]).

Après ce premier exercice, le même type d'étude a été repris à plus large échelle et constitue le contenu de la thèse et de l'article de 2011.

5.2.3 Étude sur les facteurs de risque du mésothéliome (2011)

L'objectif de cette étude (Baumann *et al*, 2011) était de vérifier l'effet de différentes variables susceptibles d'être des facteurs de risque du mésothéliome. L'intérêt portait principalement sur l'existence de serpentinite et/ou d'antigorite dans un voisinage proche du lieu d'habitation de la tribu.

Cent neuf cas de mésothéliome ont été recensés entre 1984 et 2008 dans une aire géographique comprenant trois unités géologiques susceptibles de contenir de l'amiante. Parmi eux, 97 ont été diagnostiqués sur l'anatomopathologie, un sur le dossier clinique et 11 sont considérés comme mésothéliomes possibles d'après l'histologie et la clinique. Les cas ont été pistés pour reconstituer les sources possibles d'exposition (résidences successives, écoles, métiers). Finalement 5 cas ont été exclus de l'analyse car ayant vécu en Nouvelle-Calédonie moins de 20 ans.

L'analyse écologique porte sur l'unité statistique « tribu » (100 tribus en tout). Une liste de 17 variables caractérisant les tribus a été établie. Ces variables ont été retenues comme facteurs de risque potentiels du mésothéliome. En partant des aires où ont vécu les cas, les facteurs recherchés étaient les suivants : l'existence de maisons avec pö trémolitique, les affleurements de serpentine ou d'amphibole, l'existence de carrières de serpentine, la proximité de réseau routier, la proximité de secteur minier, la nature du couvert végétal, l'encaissement des vallées. Puis cette méthode a été étendue aux tribus sans cas. Les variables ont été construites pour chaque tribu à partir de l'enquête géologique et minéralogique et de l'enquête faite auprès des cas ou de leur entourage par intégration dans un système d'information géographique.

Liste des 17 variables prises en compte dans les analyses :

- Présence ou absence de serpentinite sur les routes
- Présence ou absence d'antigorite
- Surface de serpentinite (km²) (3 classes : 0-1.2; 1,21-3; 3,01-30)

- Nombre de carrières dans les 20 km (3 classes : 0-3 ; 4-6 ; 7-21)
- Distance au massif de péridotite (km) (2 classes : 0-10 ; 10,01-43)
- Distance à la carrière la plus proche (km) (3 classes : 0-3 ; 3,1-9 ; 9,1-31)
- Présence ou absence de chrysotile
- Distance à la côte (2 classes : 0-4 ; 4,1-22)
- Courbure du terrain négative ou positive
- Nombre de logements recensés avec Pö (2 classes : 0 ; 1-54)
- Végétation dense ou non
- Distance à la route principale (2 classes : 0-1 ; 1,1-36,5)
- Index de l'influence de l'activité minière (tonnes/m) (2 classes : 0 ; >0)
- Présence ou absence de trémolite-actinolite
- Pente moyenne (en degrés) (2 classes : 1,6-10 ; 10,1-24,6)
- Revêtement à la chaux (Pö) : non fibreux, partiellement fibreux, totalement fibreux
- Nombre d'années d'utilisation du Pö après 1945 (3 classes : 0-10 ; 10,5-30 ; 30,1-55)

La serpentinite a été utilisée comme matériau de recouvrement des routes à partir de 1970 dans le sud et dans les années 1990 dans le nord. Après 2008, le recensement des carrières de serpentinite a été réalisé par le service des mines de Nouvelle-Calédonie. Il a été utilisé dans cette enquête. Dans chaque tribu, une enquête auprès des personnes les plus âgées a porté sur le passage à la chaux des maisons (l'histoire de cette pratique et le lieu d'extraction du matériau). Des échantillons de Pö intérieurs et extérieurs aux maisons ont été recueillis et trois catégories de Pö ont été définies : trémolitique contenant des fibres d'amiante, non trémolitique, et partiellement trémolitique.

Des échantillons de tous les éléments naturels susceptibles de contenir de l'amiante ont été recueillis. Les analyses minéralogiques ont porté sur 486 échantillons pour rechercher la présence d'amiante et la nature des fibres (par microscopie optique en lumière polarisée, et si nécessaire, par META). Pour des raisons d'économie, seulement 94 échantillons ont été analysés par les deux méthodes. Sur les 392 échantillons restants, 97 étaient négatifs et la microscopie optique en lumière polarisée a été considérée comme suffisante pour déterminer la nature des fibres dans les autres échantillons.

L'indice de l'influence de l'activité minière est égal à $T \times W/D/1000$ où T est le tonnage de nickel extrait entre 1940 et 1980, W un coefficient dépendant de l'orientation de la mine par rapport à la tribu et du vent dominant et D la distance entre le centre de la tribu et le massif minier le plus proche.

En dehors des variables décrites ci-dessus, les autres variables ne sont pas décrites précisément, par exemple la notion de présence ou d'absence d'antigorite, de chrysotile, de trémolite-actinolite ou de serpentinite et l'article n'indique pas exactement comment sont construites les variables relatives au Pö.

Méthode statistique :

Une régression logistique portant sur le fait pour une tribu d'avoir eu ou non au moins un cas de mésothéliome parmi ses membres considère comme variables « explicatives » les 17 variables environnementales caractérisant l'aire géographique de la tribu.

Dans la thèse, il est dit que deux analyses ont été réalisées : dans la première, chaque cas est « attribué » à la tribu où il a vécu le plus longtemps (pourvu que ce soit au moins 20 ans avant le diagnostic), dans la seconde, chaque cas est « attribué » à la tribu où il a vécu 30 ans avant le diagnostic mais seule la seconde analyse est présentée (Baumann, 2010).

Une régression de Poisson a également été faite en parallèle à la régression logistique. Elle porte sur le risque relatif de mésothéliome dans chaque tribu.

Résultats :

Le premier facteur de risque hautement significatif de la régression logistique multidimensionnelle est la présence de serpentinite sur les routes (OR = 465, IC 95% : [46,2 - 4679,7]). Ensuite apparaissent les facteurs suivants :

- présence d'antigorite versus absence, (OR= 35,8, IC 95% : [4,05-316,6]),
- distance du massif < 10 km versus > 10 km (OR= 19,825, IC 95% : [2,93-134,05]),
- surface de serpentinite : 2,01- 30 km² versus 0-2 km² (OR= 9,77, IC 95% : [1,87-51,04]),
- présence de chrysotile versus absence,
- courbe du terrain négative versus positive.

La couverture des maisons par du Pö ne ressort pas comme facteur de risque (il faut noter que la composition du Pö est variable d'un endroit à l'autre).

Le modèle de régression de Poisson comprend 6 facteurs déterminants : serpentinite sur les routes, présence d'antigorite, distance d'un massif de péridotite <= 10 kms, surface de serpentinite > 2 km², présence de chrysotile, distance à la plus proche carrière <= 5 km. Trois facteurs protecteurs apparaissent : pente moyenne < 10°, courbure négative, distance à la côte <= 4 km.

Discussion des auteurs :

Les principaux facteurs de risque accru de présence de cas dans les tribus sont liés à la serpentinite. Les auteurs expliquent l'importance de l'effet de l'antigorite par sa forme fibreuse qui provient de l'effritement des roches produisant des éléments de plus en plus petits. Des carrières de serpentinite non officielles comprenant principalement de l'antigorite étaient abondantes et ce matériau a été utilisé de façon commune pour recouvrir les routes. La proximité des massifs de péridotite est également associée à un risque accru de présence de cas dans les tribus mais l'index d'activités minières ne l'est pas.

5.2.4 Synthèse des études épidémiologiques

Les deux études à visée étiologique sont de même nature, la seconde étant beaucoup plus approfondie que la première. La synthèse portera donc surtout sur la seconde étude qui est détaillée dans la thèse.

Les limites :

Dans les deux études, toute l'analyse, y compris l'étude géologique et minéralogique repose sur les cas, ce qui nécessite une bonne qualité des données du registre (diagnostic, exhaustivité des cas et absence de doublons). Ces cas semblent avoir fait l'objet d'une enquête approfondie (données permettant le diagnostic, recherche de leur histoire résidentielle, de leur histoire professionnelle...). Cependant le déclassement du registre en 2008 jette un doute sur la qualité de cet enregistrement. Il faut remarquer que les critiques du Comité des Registres portent sur l'ensemble des cancers et non sur les cas spécifiques de mésothéliome. Elles mettent en cause l'absence d'utilisation et de recoupement des différentes sources (certificats de décès, données de sécurité sociale, données des anatomopathologistes, etc.).

Dans la période 1989-2003, le nombre annuel moyen de cas de mésothéliomes était de 4,1 chez les hommes et de 3,6 chez les femmes (Baumann, 2005). Lors de son audition¹⁵ à l'Anses, la personne responsable du registre de Nouvelle-Calédonie a indiqué que le nombre moyen annuel de mésothéliomes depuis 2008 était plus faible (de l'ordre de 2 à 3). Cependant les données précises sur cette période ne nous ont pas été communiquées. Une explication possible serait que des sources d'exposition potentielle auraient diminué (dont la baisse de Pö dans les maisons, et l'augmentation du bitume sur les routes). En effet, en 1995, à la suite de l'étude de Goldberg *et al*

¹⁵ Audition de juillet 2013

(1994), il y a eu une sensibilisation de la population au risque de mésothéliome et une incitation à déménager dans des habitations sans Pö. Mais la destruction des maisons a pris un certain temps (Quenel et Cochet, 2001) et n'est pas complète à ce jour. Ce seul changement ne semble pas suffisant pour expliquer la diminution observée du nombre de cas en raison d'un délai trop faible entre 1995 et la période 2008-2012 (à peine 15 ans). En effet, le délai de latence du mésothéliome est en général compris entre 30 et 40 ans.

La principale limite est de nature méthodologique : l'emploi d'une analyse écologique i.e. portant sur des groupes de sujets (les tribus). Le risque étudié dans une analyse de ce type est celui d'observer la survenue d'au moins un cas dans un groupe, ce n'est pas celui, **pour un sujet** d'être atteint de mésothéliome. L'analyse est donc moins intéressante que les analyses portant sur les sujets eux-mêmes et les conclusions de ces deux types d'étude ne sont pas interchangeables.

Enfin, les auteurs ne discutent pas suffisamment les limites de leur étude, en particulier les limites inhérentes à l'utilisation d'une analyse écologique. De plus, le mode de construction de certaines variables n'est pas donné, ni dans l'article ni dans la thèse, en particulier celui de la variable « présence d'antigorite » ; ce qui dans la présente expertise, est très limitant. Ils ne justifient pas le choix des variables environnementales qu'ils ont construites (par exemple les classes utilisées).

Les points forts :

Les données à la fois minéralogiques et sanitaires disponibles permettent de penser avec quelque certitude qu'il y a réellement un problème d'origine environnementale en Nouvelle-Calédonie concernant le mésothéliome. Le fait qu'il y a une forte incidence de mésothéliomes dans la province Nord, en particulier à Houaïlou, parmi les Mélanésiens et que les taux soient similaires pour les deux sexes suggère un problème environnemental. Il est naturel de penser que l'origine du problème se trouve dans les habitudes de vie des Mélanésiens et/ou dans leur environnement immédiat.

Le principal facteur de risque du mésothéliome est l'amiante, au point de considérer cette pathologie comme un « marqueur » de cette exposition (InVS, 2010). Il y a donc de fortes présomptions d'une exposition à des fibres asbestiformes que ce soit via le Pö (une campagne de mesures de fibres de trémolite a été faite en 1998 à l'intérieur des maisons (Quenel et Cochet, 2001)) ou via le revêtement des routes. Cependant, les études citées ci-dessus ne permettent pas de statuer sur le rôle de chaque facteur de risque ni sur la contribution des différentes fibres asbestiformes présentes dans l'environnement et en particulier de l'antigorite fibreuse.

Points clés

Il n'existe que très peu d'études relatives à la toxicité de l'antigorite. Quatre études anciennes sur certaines fibres d'amiante utilisent l'antigorite non fibreuse comme « témoin minéral non fibreux ». L'antigorite y apparaît peu active voire inactive. Elle se révèle cytotoxique dans une seule étude, et ce à forte dose.

Deux études *in vitro* plus récentes confirment une cytotoxicité des formes fibreuses d'antigorite à des doses relativement élevées, sans qu'il soit possible :

- de comparer antigorite fibreuse et non fibreuse ;
- de statuer sur un éventuel effet mutagène ou cancérigène de l'antigorite.

La seule étude *in vivo* disponible retrouve certes un effet cancérigène après injection intrapéritonéale chez des rats et des souris, mais là encore il est difficile d'attribuer cet effet de manière univoque aux fibres d'antigorite.

Enfin, les données épidémiologiques disponibles sont en faveur d'une origine environnementale de l'excès de mésothéliomes observé en Nouvelle-Calédonie. Cependant, elles ne permettent pas d'imputer cet excès à l'exposition à l'antigorite, pour plusieurs raisons :

- le choix du paramètre étudié (tribu comportant au moins un cas) est discutable ;
- il s'agit d'une étude écologique, dont la définition des paramètres étudiés ne permet pas d'isoler l'exposition à l'antigorite comme facteur de risque indépendant ;
- les connaissances géologiques utilisées lors de cette étude, retranscrites sur la cartographie utilisée, ne permettaient pas une discrimination suffisamment fine entre des zones présentant des affleurements de chrysotile, de trémolite et d'antigorite.

Au total, les données disponibles ne permettent :

- ni de confirmer, ni d'infirmer un effet cancérigène de l'antigorite ;
- ni de distinguer le potentiel toxique des différentes formes minérales d'antigorite, même si quelques unes de ces données évoquent une cytotoxicité des formes fibreuses en général (« effet fibre » ?).

6 Toxicologie des silicates fibreux non classés « amiante »

Les données spécifiques à l'antigorite sont donc très peu nombreuses et parcellaires quant à ses effets et mécanismes d'action éventuels. La revue de la littérature relative aux fibres classées amiante met en évidence l'existence présumée de mécanismes d'actions communs au chrysotile (phyllosilicate du sous-groupe des serpentines) et aux 5 autres amiantes, inosilicates du sous-groupe des amphiboles (Barlow 2013).

Du fait de sa plausibilité biologique, ceci rend donc licite l'étude d'autres silicates fibreux afin d'identifier d'éventuels facteurs communs avec l'antigorite, susceptibles de constituer des éléments de présomption quant à ses effets biologiques.

6.1 Rappels de minéralogie

Dans la nature, de nombreux minéraux peuvent se présenter sous une morphologie fibreuse. Pour Skinner *et al.* (1988), ces minéraux sont un peu moins de 400, dont une centaine de silicates et d'alumino-silicates. Certains de ces minéraux fibreux sont considérés dans différentes études comme potentiellement dangereux en raison de leurs propriétés physico-chimiques (WHO, 1986 ; Gibbs, 1990 ; Wachowski, 2000).

Guthrie (1992) a réalisé une synthèse des effets biologiques induits par l'inhalation de minéraux autres que les six amiantes. Les minéraux considérés dans cette synthèse appartiennent à la classe des oxydes et des hydroxydes et à la classe des silicates.

En 2009, Hendrickx a effectué une synthèse des occurrences amiantifères naturelles dans l'Est de l'Australie et dresse une liste des minéraux asbestiformes considérés comme susceptibles de provoquer des effets sur la santé humaine. En plus des six minéraux du groupe des amiantes, Hendrickx (2009) mentionne l'érionite et plusieurs autres minéraux de la classe des silicates dont l'antigorite et plusieurs amphiboles (édénite et fluoro-édénite, winchite, richtérite, magnésio-arfvedsonite).

Dans le groupe des minéraux fibreux asbestiformes n'appartenant pas aux six minéraux du groupe des « amiantes », Dogan (2013) inclut également la richtérite, la winchite, la fluoro-édénite et la magnésio-arfvedsonite, et y ajoute plusieurs autres silicates : l'arfvedsonite, la balangeroite, la carlosturanite et la gagéite.

Les effets induits par l'inhalation des minéraux cités ci-dessus sont actuellement plus ou moins bien documentés en fonction de l'espèce considérée. A l'heure actuelle, les études les plus convaincantes concernent généralement des espèces minéralogiques appartenant à la classe des silicates et, en particulier, aux sous-classes des inosilicates (amphiboles), des phyllosilicates (serpentines) et des tectosilicates (zéolites). La classification de ces minéraux est explicitée en annexe 2.

Les minéraux pris en considération dans cette synthèse sont listés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Minéraux cités, leur place dans la classification et leur composition chimique (cf. annexe 2)

Classification	Formule chimique
<i>inosilicates à chaîne simple non ramifiée</i>	
Wollastonite	CaSiO ₃
Balangeroite	(Mg, Fe, Fe, Mn) ₄₂ Si ₁₆ O ₅₄ (OH) ₄₀
<i>inosilicates à chaîne double non ramifiée</i>	
Winchite	(Ca,Na)Mg ₄ (AlFe ³⁺)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Richtérite	Na(Ca,Na)Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
Fluoro-Edénite	NaCa ₂ Mg ₅ Si ₇ AlO ₂₂ F ₂
Magnésio-Arfvedsonite	NaNa ₂ (Mg ₄ Fe ³⁺)Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂
<i>Inosilicates à chaîne non ramifiée de périodicité >2</i>	
Carlosturanite	(Mg, Fe, Ti, Mn) ₂₁ (Si,Al) ₁₂ O ₂₈ (OH) ₃₄
Phyllosilicates en feuillet à six membres	
Talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
Phyllosilicates en couches modulées	
Palygorskite (Attapulgite)	(Mg,Al) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH)·4(H ₂ O)
Tectosilicates du groupe des zéolites	
Érionite	(Ca, K ₂ , Na ₂) ₂ Al ₄ Si ₁₄ O ₃₆ ·15H ₂ O

6.2 Problématique générale de la toxicité des fibres

Pour comprendre la difficulté de l'approche toxicologique des fibres minérales, il convient de conserver à l'esprit ce qui a déjà été évoqué dans les chapitres précédents :

- la définition d'une « fibre », fondée sur les critères dimensionnels rappelés au chapitre 1, même si elle se réfère partiellement à des notions de physiologie, à savoir la capacité de la particule à pénétrer l'arbre bronchique jusqu'à l'alvéole pulmonaire, demeure relativement arbitraire ;
- la distinction initiale entre les fibres d'« amiante » et les autres particules minérales naturelles répondant à la définition réglementaire d'une fibre est commerciale et non fondée sur les seules données minéralogiques et/ou toxicologiques.

Pour ces deux raisons, les données de toxicité ne permettent pas d'affirmer que seules les fibres d'amiante réglementées composent le champ des « fibres minérales naturelles cancérigènes », ou plus globalement toxiques (fibrosantes, mutagènes, etc.). En d'autres termes, même si les six espèces minérales dénommées « amiantes » sont de fait toutes cancérigènes, on ne peut pas affirmer que ce sont les seules fibres minérales toxiques, ou les plus toxiques...

Le présent chapitre vise donc à dresser un état des connaissances sur les minéraux fibreux non classés « amiante », donc à s'interroger sur le second point évoqué ci-dessus. Le premier point, relatif à l'étude de la toxicité de particules d'amiante ne répondant pas strictement à la définition d'une fibre selon les critères dimensionnels de l'OMS (fibres courtes et fibres fines d'amiante) a déjà fait l'objet d'un rapport de l'Afsset en 2009.

Si les données disponibles sur la toxicité des six amiantes sont relativement abondantes, elles sont beaucoup plus éparses sur les autres formes de fibres minérales naturelles, comme cela vient d'être démontré pour l'antigorite.

Plusieurs publications ont eu pour objet de réaliser une synthèse des données de toxicité des fibres minérales (Bignon *et al.*, 2000). Le panorama le plus complet est établi dans un rapport du NIOSH révisé en 2011. Celui-ci, intitulé¹⁶ « Les fibres d'amiante et les autres particules minérales allongées: état de la science et feuille de route pour la recherche », traite de l'ensemble des particules minérales allongées (PMA), classées ainsi :

- les fibres d'amiante, par essence asbestiformes, c'est-à-dire les six formes minérales d'amiante cristallisées sous forme linéaire, unidimensionnelle, leur donnant un aspect de « cheveu » à bords parallèles ;
- des fibres minérales tout à fait comparable à l'amiante, mais n'ayant pas eu d'application commerciale (richtérite et winchite) ;
- une amphibole asbestiforme (la fluoro-édénite) ;
- des fibres « ressemblant à de l'amiante » : antigorite fibreuse ;
- les fragments de clivage et fibres non asbestiformes des analogues de l'amiante ;
- les autres fibres non asbestiformes.

Cette terminologie rend bien compte de la difficulté à délimiter les périmètres respectifs des « fibres » et de l'« amiante ». Comme le souligne le rapport du NIOSH (2011), ces imprécisions terminologiques rendent difficile la comparaison entre les différentes études toxicologiques disponibles. Cet avis est partagé par d'autres auteurs (Case *et al.*, 2011). Il serait donc nécessaire, pour analyser et comparer les travaux publiés, de recueillir pour chacun d'eux des données précises quant aux échantillons de particules étudiés, en termes de composition et de dimensions notamment. A la lecture de la littérature disponible, cela n'est pas toujours possible.

Il faut noter que le NIOSH, dès 1990, a recommandé d'inclure dans le champ d'application de la réglementation sur l'amiante (notamment en terme de mesure des expositions), les « particules minérales allongées des analogues non asbestiformes des minéraux amiantes » (NIOSH, 1990).

Face au nombre considérable de minéraux susceptibles de produire des particules minérales allongées (PMA) répondant à la définition actuelle de « fibres » et afin de conserver une certaine plausibilité à la comparaison des effets biologiques de ces minéraux avec les données disponibles sur les amiantes, ne seront abordées dans ce chapitre que les fibres appartenant à la classe des silicates. Seront donc exclues, notamment, les fibres d'oxydes et hydroxydes, de sulfates et de phosphates.

6.3 Silicates asbestiformes non classés amiantes

Seront traités dans ce chapitre des minéraux ayant été formés par cristallisation linéaire, unidimensionnelle (ce qui n'exclut pas qu'il existe des modes de cristallisation bi- ou tridimensionnelle à partir de la même unité cristalline de base). Il peut s'agir :

- Soit de minéraux appartenant aux mêmes groupes que les amiantes, à savoir amphiboles et serpentines. En pratique, du fait du mode de croissance cristalline qui conditionne la présentation asbestiforme, aucune serpentine autre que le chrysotile ne serait authentiquement asbestiforme. Seules des amphiboles sont donc décrites dans cette catégorie. Il s'agit :
 - de la richtérite et de la winchite, faisant partie du sous-groupe de la richtérite ;

¹⁶ Traduction libre

- de la fluoro-édénite appartenant au sous-groupe de la trémolite ;
- de l'arfvedsonite et de la magnésio-arfvedsonite, du sous-groupe du glaucophane ;
- de la cummingtonite (du sous-groupe du même nom) ; certains auteurs évoquant pour celle-ci une présentation « semi-asbestiforme ».

Leur forte homologie structurale avec les autres amphiboles explique qu'elles ont, dans certaines études anciennes, été comptabilisées comme de la trémolite-amiante (notamment dans le cas de la winchite et de la richtérite).

- Soit de minéraux appartenant aux mêmes sous-classes de silicates que les amiantes, à savoir inosilicates et phyllosilicates, mais à des groupes différents. Il ne semble pas exister d'autre phyllosilicate asbestiforme, ce qui ferait du chrysotile le seul minéral asbestiforme de cette sous-classe. Par contre, plusieurs inosilicates pourraient présenter une morphologie asbestiforme :
 - la carlosturanite (du groupe du même nom)
 - la gagéite et la balangeroite (deux représentants du groupe de la gagéite).
- Soit de formes minérales appartenant à d'autres sous-classes de silicates. Est décrite de manière unique dans cette catégorie l'érieronite. Ce minéral appartient au groupe des zéolites, de la sous-classe des tectosilicates, qui comporte lui-même deux sous-groupes : celui de la mordenite et de la chabazite. C'est à ce dernier sous-groupe qu'appartient l'érieronite.

6.3.1 Données sur les minéraux asbestiformes appartenant aux mêmes groupes que les amiantes

Données humaines

La synthèse du NIOSH (2011) s'appuie sur les études menées auprès de la population professionnelle (mineurs) et générale de Libby, dans le Montana, où sont exploitées des mines de vermiculite fortement contaminées par des fibres de richtérite, de winchite, ainsi que d'amiante trémolitique. (Meeker *et al*, 2003). Le suivi épidémiologique a confirmé une très forte augmentation des SMR pour les fibroses pulmonaires, les cancers pleuraux et mésothéliomes et, dans une moindre mesure, les cancers bronchopulmonaires (Sullivan 2007). Il n'est cependant pas possible de distinguer les contributions respectives de chacun des trois types de fibres à ces diverses pathologies.

De même, un excès localisé de mésothéliomes dans une région sicilienne (zone de Biancavilla) a été attribué à l'exposition environnementale à la fluoro-édénite. (Comba *et al*, 2003). Cette hypothèse semble confirmée par la présence de fibres de fluoro-édénite dans les expectorations de 50% (6 sur 12) des victimes de mésothéliomes testées (Putzu *et al*, 2006). Dans la même population, une étude écologique suggère le rôle de la fluoro-édénite dans la survenue d'un excès de bronchopneumopathies chroniques obstructives (Biggeri *et al*, 2004).

Etudes in vitro et in vivo

Il n'existe que très peu d'études concernant les effets biologiques et les mécanismes d'action de ces formes minérales.

Nous n'avons pas retrouvé d'étude de mutagénèse ou de cancérogénèse concernant la richtérite ou la winchite. Dans une étude comparant l'effet hémolytique et la toxicité sur des macrophages pulmonaires en culture de différentes formes de silicates fibreux (anthrophyllite, crocidolite, chrysotile, wollastonite, richtérite), de quartz et de dioxyde de titane, la richtérite s'est avérée moins toxique que les amiantes ou le quartz mais plus toxique que le dioxyde de titane (Collan *et al*, 1986).

Seule la fluoro-édénite a fait l'objet de plusieurs études de la part d'équipes italiennes.

Une étude a comparé la toxicité de fibres radiomarquées de fluoro-édénite, pauvres ou riches en fer et de trémolite non ferreuse, sur des cellules mésothéliales humaines non malignes MET-5A et des macrophages de souris de la lignée monocyttaire J774 (Cardile *et al*, 2007). Les fibres ont été

purifiées par technique gravimétrique. Leurs dimensions moyennes étaient de 30µm de long sur 5µm de diamètre.

Dans cette étude, les fibres de fluoro-édénite induisent de manière dose dépendante des EADO et des EADN et une altération de la viabilité cellulaire. Les fibres de fluoro-édénite sont plus actives que celles de trémolite en termes de production d'EADO, d'EADN et de LDH. Les fibres radiomarquées et riches en fer génèrent davantage d'EADO. Les cellules macrophagiques semblent plus sensibles que les cellules mésothéliales, suggérant selon les auteurs, que les macrophages seraient la cible initiale de la cascade physiopathologique.

Notons que les dimensions des fibres utilisées sont grandes et dépassent les capacités de traitement par les macrophages. Ces dimensions les rendent en outre difficilement inhalables. La transposition *in vivo* de cette étude *in vitro* doit donc être prudente.

Dans une autre étude, des cellules tumorales pulmonaires A549 mimant le comportement de cellules épithéliales alvéolaires sont exposées à des fibres de fluoro-édénite. Les cellules tentent de phagocyter les fibres et relarguent des facteurs proinflammatoires comme de l'interleukine 6, un des médiateurs en cause dans la physiopathologie des lésions induites par les amiantes. (Travaglione *et al*, 2003)

Synthèse

Si l'on excepte leur absence d'usage commercial, la winchite, la richtérite, la fluoro-édénite présentent une telle parenté chimique et structurale avec les amiantes qu'elles semblent pouvoir être considérées au même plan quant à leurs propriétés biologiques et à leur toxicité. Bien que les données expérimentales soient peu nombreuses, les résultats épidémiologiques suggèrent l'existence d'un effet cancérigène sur le poumon et la plèvre ainsi qu'un effet fibrosant.

6.3.2 Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes sous-classes que les minéraux dits amiantes

La gagéite

Aucune donnée toxicologique n'a pu être retrouvée sur ce minéral.

La balangéroite

Inosilicate appartenant au groupe de la gagéite, la balangéroite tire son nom de la mine de Balangero en Italie où ce minéral coexiste avec le chrysotile. Sur le plan morphologique, elle se présente sous la forme de fibres fines, rigides et fragiles.

Aucune étude épidémiologique n'a pu être identifiée concernant le rôle spécifique de la balangéroite, dans la mesure où les travailleurs exposés à ce minéral sont simultanément exposés à l'amiante, au chrysotile notamment. Une publication sur le suivi de la cohorte des mineurs de la mine de Balangero ne met en outre en évidence qu'un excès significatif (mais fondé sur 8 cas seulement, l'alcool pouvant constituer un facteur de confusion) de cancers du larynx, ainsi qu'un excès des cancers de la plèvre (2 cas). L'étude ne met pas en évidence d'excès de cancer pulmonaire. La fraction de risque attribuable à la balangéroite n'est pas évaluable (Piolatto *et al*, 1990).

Tous les travaux disponibles sur la toxicité de la balangéroite ont été publiés par la même équipe italienne. *In vitro*, la balangéroite serait comparable à la crocidolite en termes de quantité de fer réactif de surface, de durabilité dans une solution mimant les fluides corporels, de cytotoxicité sur des cellules épithéliales pulmonaires humaines A549 et de consommation des anti-oxydants intracellulaires (Grosso *et al*, 2005 ; Turci *et al*, 2005 ; Gazzano *et al*, 2005). Elle serait néanmoins peu écopersistante car sa structure siliceuse serait plus rapidement altérée par les agents physiques et chimiques que le chrysotile ou surtout que la trémolite (Enrico Favero-Longo *et al*, 2009). Dans un liquide phagolysosomal, sa dégradation serait similaire à celle du chrysotile alors que la trémolite serait quasiment stable (Turci *et al*, 2009).

Carlosturanite

Aucune donnée toxicologique n'a pu être retrouvée sur ce minéral.

6.3.3 Données sur les minéraux asbestiformes d'autres sous-classes que les amiantes

L'ériionite, zéolite appartenant au sous-groupe de la chabazite, a fait l'objet d'un nombre relativement important de publications

Données humaines :

Les données épidémiologiques disponibles au sujet de l'ériionite proviennent de manière unique du suivi d'une population turque habitant dans des villages construits majoritairement à l'aide de blocs rocheux d'origine volcanique contenant de l'ériionite, un silicate d'aluminium hydraté contenant du sodium et du calcium.

Un excès franc de mésothéliomes pleuraux et péritonéaux ainsi que de cancers du poumon a été observé dans des villages de Cappadoce et d'Anatolie (Baris *et al*, 1981, 2006). En outre, dans les villages exposés, des prélèvements de tissu pulmonaire de moutons confirment la présence de fibres d'ériionite dans des rapports de concentration comparables avec les niveaux d'exposition atmosphériques, ce qui constitue selon les auteurs un critère fort d'imputabilité de cet excès de cancers à l'ériionite. (Baris *et al*, 1987)

L'ériionite a été classée cancérigène de catégorie 1 par le Circ dès 1987, avec des preuves humaines et animales suffisantes (IARC, 1987).

Etudes in vitro et in vivo :

Des études *in vivo* ont confirmé le potentiel cancérigène de l'ériionite, notamment avec la survenue de mésothéliomes.

Dans une étude sur les mésothéliomes induits par l'ériionite chez les rats, cet effet cancérigène ne semble pas lié à une altération du gène p53, ce qui est comparable aux données de la littérature concernant les fibres d'amiantes (Kleymenova *et al*, 1999).

D'assez nombreuses études *in vitro* ont été conduites afin d'identifier les mécanismes d'action de l'ériionite. L'exposition de macrophages alvéolaires à des fibres d'ériionite conduit à la production d'EADO, dont le potentiel génotoxique est bien connu (Mossman et Sesko, 1990). Le fer présent à la surface des fibres d'amiantes est considéré comme l'un des principaux facteurs à l'origine de leur potentiel de génération des EADO et EADN. L'ériionite étant relativement pauvre en fer, diverses études ont visé à explorer le rôle du fer dans le potentiel mutagène de l'ériionite. Dans une étude de 1995, l'ériionite seule n'a pas été capable d'induire des ruptures simple brin de l'ADN (sur ADN phi X174 RFI). Elle a par contre acquis son potentiel génotoxique après prétraitement dans des solutions de fer ferreux ou ferrique, conduisant à l'adsorption de fer sur la surface des fibres (Eborn et Aust, 1995). Dans une étude sur cellules ovariennes de hamster AS52, comparant les effets de l'ériionite avec la mordenite, une zéolite non fibreuse, l'ériionite s'est avérée beaucoup plus toxique que la mordenite. La cytotoxicité des deux types de fibres a été accentuée par l'adjonction de fortes doses de fer ferreux mais seule l'ériionite a fait preuve d'un potentiel mutagène, lui aussi augmenté en présence de fer (Fach *et al*, 2003).

Enfin, dans une étude sur cellules macrophagiques pulmonaires de rat NR 8383, Fach, a démontré que ce n'est pas la quantité totale de fer adsorbé mais bien la quantité de fer réactif qui était en cause dans la toxicité de la fibre. Ce paramètre serait l'une des explications à la nette différence de toxicité entre l'ériionite et la mordenite dont la teneur en fer est similaire. Dans cette étude, la genèse d'EADO était inversement proportionnelle à la taille des fibres (Fach *et al*, 2002).

Quelques études ont également tenté d'explorer la réponse cellulaire induite par l'exposition à l'ériionite. Dans une étude *in vitro* sur des cellules mésothéliales humaines, l'ériionite s'est avérée peu cytotoxique mais capable d'induire une prolifération cellulaire, et ce indépendamment de la

présence de séquence virale SV40 (Simian virus 40), évoquée comme un cofacteur dans la cancérogenèse induite par les amiantes. Cette étude révèle notamment que l'ériionite stimule la production de facteurs de prolifération cellulaire (Erk 1/2)¹⁷ mais aussi de facteurs anti-apoptotiques (Akt¹⁸, NF-κB) (Bertino *et al*, 2007). Ce mécanisme semble corroborer les résultats d'une autre étude menée sur des cellules mésothéliales pleurales de rat. L'ériionite induit ainsi une prolifération cellulaire de manière comparable avec la crocidolite, mais à l'inverse de la crocidolite, elle n'induit pas d'apoptose. Le fort potentiel cancérogène de l'ériionite serait donc lié à une élévation du rapport entre prolifération cellulaire et apoptose (Timblin *et al*, 1998).

Notons enfin que les effets d'un échantillon de mordenite (contenant 10 à 12% de fibres ou aiguilles de diamètre moyen 0,8µm (0,4 à 1,4), dont 90% de longueur inférieure à 8µm et 10% de 8 à 16µm) ont été comparés à ceux d'autres particules (quartz, terre de diatomées et clinoptilolite) dans une étude réalisée *in vitro* sur des érythrocytes et des macrophages péritonéaux, et *in vivo* par instillation intratrachéale sur des rats. La mordenite a induit une cytotoxicité modérée (hémolyse et relargage extracellulaire de LDH) ainsi que des lésions pulmonaires aiguës et subaiguës, plus marquées 7 jours que 15 jours après l'exposition. En outre, ces lésions ne sont apparues que lors de l'instillation des formes fibreuses/aciculaires de mordenite, ce qui tend à prouver que ce critère morphologique est à l'origine de la cytotoxicité observée (Adamis *et al*, 2000).

Synthèse :

L'ériionite, appartenant à une sous-classe minéralogique différente des amphiboles et des serpentines, partage avec les amiantes un mode de cristallisation linéaire conduisant à l'existence de formes fibreuses, asbestiformes. Les données épidémiologiques sont en faveur d'un pouvoir cancérogène puissant, considéré par plusieurs auteurs comme plus puissant que celui des amiantes elles-mêmes. Les études comparant l'ériionite avec certaines formes d'amiante d'une part, et avec son homologue non fibreux (la mordenite) d'autre part sont en faveur de l'existence de trois paramètres majeurs de cancérogénicité :

- la morphologie fibreuse, asbestiforme ;
- la capacité de la fibre à adsorber du fer sous forme réactive, c'est-à-dire disponible pour participer à la réaction de Fenton ;
- l'élévation du rapport entre prolifération cellulaire et apoptose via l'induction de facteurs prolifératifs et anti-apoptotiques.

6.4 Silicates non asbestiformes

6.4.1 Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes groupes que les amiantes

Il s'agit d'amphiboles et de serpentines cristallisées sous forme prismatique, en tous cas bidimensionnelle ou tridimensionnelle. Ces minéraux peuvent néanmoins émettre, par fragmentation, des particules dont les dimensions peuvent répondre à la définition internationale des fibres (longueur >5µm, largeur inférieure à 3 µm, rapport d'allongement <3 :1). Si l'on se réfère aux classifications jusqu'à présent utilisées dans la littérature médicale, ces silicates peuvent être :

- Soit des espèces chimiques identiques aux amiantes, c'est-à-dire les présentations non asbestiformes des amiantes. Ceci ne correspond en pratique qu'aux amphiboles non

¹⁷ Appartient à la famille des MAP kinases, impliquées dans la division et la prolifération cellulaires.

¹⁸ Protéine kinase B (*Ak* pour le nom d'une lignée de souris et *t* pour « transforming ») ayant un rôle dans la croissance tissulaire et des propriétés anti-apoptotiques.

asbestiformes: cummingtonite-grunérite (analogue de l'amosite), riébeckite (analogue de la crocidolite), et formes non asbestiformes de l'actinolite, de l'anthophyllite et de la trémolite.

- Soit des espèces chimiques différentes des amiantes, soit par leur composition, soit par les conditions ayant présidé à leur cristallisation (pression, température, stabilité, etc.).

L'antigorite appartient à cet ensemble et a été traité spécifiquement dans ce rapport. Ne seront donc traités ici que :

- la lizardite et le sous-groupe des amésites (serpentes) ;
- la magnésiohornblende, inosilicate appartenant au groupe des amphiboles calciques et classé dans le sous-groupe des trémolites. Ce silicate ne semble exister que sous forme prismatique, jamais asbestiforme.

Données humaines :

Il n'existe pas de données épidémiologiques portant uniquement sur ces fibres. En effet, les seules études retrouvées traitant des analogues non asbestiformes des amiantes ne les abordent qu'en co-exposition avec des fibres d'amiante.

Aucune étude n'a été retrouvée concernant la lizardite fibreuse. Dans une étude ancienne menée en Turquie sur les affections cancéreuses thoraciques admises dans un hôpital, sur 23 cas de mésothéliomes pleuraux diagnostiqués, 22 provenaient des environs de la ville de Cernik. L'analyse des poussières auxquelles la population était exposée a certes révélé la présence de lizardite, d'antigorite non fibreuse mais aussi de trémolite-amiante.

Gylseth a analysé des prélèvements post-mortem réalisés sur deux mineurs de taconite finlandais : le premier décédé d'un carcinome à petites cellules sur fibrose pulmonaire associée, le second d'un carcinome à cellules squameuses peu différencié sur silicose. Les analyses minéralogiques ont retrouvé dans les prélèvements tissulaires la présence de cummingtonite-grunérite, d'hornblende et d'actinolite dans des rapports de concentration similaires à ceux observés dans l'atmosphère de la mine. Il ne s'agit cependant que de données descriptives sur 2 cas, sans qu'il soit possible d'établir de lien de causalité entre l'une ou l'autre de ces fibres et les cancers observés (Gylseth *et al*, 1981).

Aucune étude épidémiologique ou donnée humaine prenant en compte la riébeckite n'a été identifiée. Parmi les études évoquant les particules asbestiformes d'actinolite, de trémolite ou d'anthophyllite, il n'est pas possible d'identifier ou de dissocier des données spécifiques à leurs analogues non asbestiformes.

Données in vitro et in vivo :

Dans une étude de cytotoxicité, Palekar a comparé les effets de fibres asbestiformes de grunérite (amosite) et de cummingtonite avec des particules aciculaires de cummingtonite et de grunérite sur des érythrocytes de mouton et des cellules ovariennes de hamster chinois. A surface égale, la grunérite asbestiforme était plus toxique que, dans cet ordre, la cummingtonite asbestiforme, la cummingtonite aciculaire¹⁹ et la grunérite aciculaire. Ceci suggère qu'à composition chimique égale, les fibres asbestiformes sont plus toxiques que les particules aciculaires (Palekar *et al*, 1979).

Plusieurs études *in vitro* ont utilisé la riébeckite (et l'antigorite) en comparaison avec des fibres de leurs analogues de composition asbestiformes (crocidolite et chrysotile) et d'érionite. Elles ont été synthétisées dans un article de Mossman (Mossman, 2008).

Sur des cultures d'explants trachéaux, la crocidolite et, dans une moindre mesure, le chrysotile induisent une métaplasie épithéliale considérée comme une lésion précancéreuse. Leurs analogues non fibreux n'induisent pas cet effet (Woodworth *et al*, 1983).

¹⁹ En forme d'aiguille

Des études sur cellules épithéliales trachéales de hamster (HTE) ont en outre révélé que :

- contrairement à la crocidolite et au chrysotile, les fibres de riébeckite et d'antigorite n'induisent pas de prolifération cellulaire ;
- un moindre potentiel cytotoxique de ces analogues non asbestiformes (évalué par le relargage de chrome marqué) par rapport aux « amiantes » (Mossman *et al*, 1990);
- la riébeckite induit 5 à 10 fois moins d'EADO que la crocidolite, même après des phénomènes de phagocytose similaires.

Enfin, dans des expérimentations étudiant spécifiquement divers mécanismes de mutagenèse, les fibres de riébeckite et d'antigorite seraient invariablement inactives contrairement aux fibres de crocidolite, de chrysotile ou même d'érionite.

Synthèse :

Il existe peu d'expérimentations relatives aux analogues non asbestiformes des amiantes et la plupart de celles retrouvées proviennent d'un même laboratoire. Néanmoins, les données disponibles évoquent constamment un effet moindre des particules non asbestiformes par rapport à leurs analogues asbestiformes. Les paramètres dimensionnels des particules utilisées lors de ces expérimentations sont régulièrement différents : les fragments de clivage ont un diamètre supérieur et un rapport longueur sur diamètre inférieur aux fibres d'amiante. Ceci reflète sans doute la réalité des expositions mais ne permet pas une comparaison « toutes choses égales par ailleurs ». En outre, bien que les effets observés soient moins puissants, ils ne sont pas toujours nuls.

6.4.2 Silicates non asbestiformes appartenant aux mêmes sous-classes que les amiantes

Seront abordées dans ce chapitre les particules dérivées de silicates appartenant aux mêmes sous-classes que les amiantes mais à des groupes minéralogiques différents et susceptibles de présenter des formes « fibreuses » au sens réglementaire, le plus souvent sous la forme de fragments de clivage.

Sous-classe des inosilicates

C'est à cette famille qu'appartiennent les amphiboles. La gagéite, la balangérite et la carlosturanite peuvent se présenter avec une morphologie de type asbestiforme mais aussi prismatique. La wollastonite est un autre représentant de cette sous-classe.

La wollastonite

Il existe des données anciennes sur la wollastonite dont les deux principaux sites d'exploitation de situaient en Finlande (Lappeenranta) et aux Etats-Unis (Willsboro). La plupart ont été utilisées par le Circ dans sa monographie 42 (IARC, 1987) sur les silicates. En se fondant sur la seule étude épidémiologique disponible, menée auprès d'une population finlandaise (preuve insuffisante), ainsi que sur quelques expérimentations *in vivo* (preuves limitées), le Circ n'a pu conclure sur la cancérogénicité éventuelle de la wollastonite, classée groupe 3. Quelques études ont été produites depuis cette monographie. Plusieurs sont en faveur d'une faible biopersistance de la wollastonite. Dans une étude testant notamment la biodurabilité de la wollastonite après instillation intra trachéale chez des femelles de rats Wistar, la demi-vie d'élimination de fibres de wollastonite (dimensions moyennes de 4,3µm pour un diamètre de 0,85µm pour la fraction inhalable et de 3,2µm pour 0,63µm pour la fraction alvéolaire) était de 15 à 21 jours (en moyenne 17 jours pour les fibres de moins de 5µm et 18 jours pour celles de plus de 5 µm). A titre de comparaison, la demi-vie de fibres de crocidolite était de 240 jours (voire infinie pour les fibres de plus de 5µm de long) (Bellman et Muhle, 1994).

La prolongation du suivi à 25 ans d'exposition d'une cohorte déjà prise en compte par le Circ n'a pas permis de mettre en évidence d'augmentation du nombre d'affections fibrosantes pulmonaires ou pleurales parmi 49 travailleurs exposés, les quelques prélèvements bronchoalvéolaires effectués confirmant également une faible biopersistance de ces fibres (Koskinen *et al*, 1997).

Enfin, Cambelova a évalué le potentiel fibrogène de fibres de wollastonite par instillation intratrachéale chez des rats males Wistar, en comparaison au quartz, à la crocidolite et à des contrôles non exposés. La wollastonite a induit une augmentation significative des marqueurs de fibrose testés par rapport aux contrôles, nettement moindre cependant que pour le quartz et la crocidolite. Dans cette étude, les dimensions des fibres n'étaient néanmoins pas strictement comparables (longueur moyenne de 12,91 μm sur un diamètre de 1,57 μm pour la wollastonite, contre 4,42 sur 0,32 μm pour la crocidolite) (Cambelova et Juck, 1994).

Au total, les nouvelles données recensées depuis la publication du Circ ne semblent pas apporter d'éléments supplémentaires en faveur d'une action cancérigène de la wollastonite (Maxim et McConnell, 2005).

Sous-classe des phyllosilicates :

Les formes potentiellement fibreuses de phyllosilicates appartiennent au groupe palygorskite-sépiolite.

Palygorskite ou attapulgite

La palygorskite (appelée attapulgite par les Anglo-Saxons) fait l'objet d'une exploitation commerciale relativement importante (elle dépassait déjà un million de tonnes par an en 1985), essentiellement dans le cadre d'une utilisation comme absorbant domestique (litière) ou industriel. Elle a donc été évaluée par le Circ en 1987. La seule étude épidémiologique disponible évoquait un possible excès de cancers pulmonaires mais seulement chez les hommes de type européen et avec une relation dose cumulée - réponse très parcellaire (preuve insuffisante). Concernant l'évaluation des effets cancérigènes, les études *in vivo* disponibles étaient apparemment discordantes mais il semble que les seuls résultats positifs aient été obtenus avec des échantillons d'attapulgite contenant un pourcentage, même faible, de fibres de plus de 4 μm de longueur (pour un diamètre généralement inférieur à 0,2 μm) (Wagner 1987). Il est néanmoins difficile de comparer ces études du fait du manque de précisions concernant les dimensions des particules dans les échantillons utilisés et la dose administrée de ces diverses particules.

Sur le plan de la mutagenèse, la palygorskite n'induirait pas de synthèse inappropriée d'ADN, contrairement au chrysotile ou à la crocidolite (Renier *et al*, 1990).

En l'absence d'autres données nouvelles depuis la précédente évaluation du Circ, il n'est pas possible de conclure sur la toxicité, et en particulier la cancérigénicité, de la palygorskite. Il n'est pas non plus possible d'exclure que les fibres longues (plus de 4 μm dans le cas de la palygorskite) possèdent un potentiel tumorigène.

Sépiolite

Le sous-groupe de la sépiolite comporte des minéraux d'aspect volontiers fibreux. La sépiolite, comme la palygorskite, est un phyllosilicate utilisé à des fins commerciales essentiellement comme absorbant. Les études de García-Romero & Suárez (2010) indiquent qu'il existe une continuité de composition chimique entre la sépiolite et la palygorskite.

Ce minerai a donc aussi fait l'objet d'une évaluation par le Circ, qui, du fait de la très faible quantité de données expérimentales et épidémiologiques disponibles, n'a pu conclure sur sa cancérigénicité (IARC, 1997). Les quelques études disponibles semblent révéler une toxicité moindre que le chrysotile ou même que la palygorskite mais elles sont effectivement rares et difficilement comparables.

Aucune donnée toxicologique n'a pu être retrouvée concernant la loughlinite, ou sodium-sépiolite, troisième représentant du groupe palygorskite-sépiolite.

NB : Le tableau 5 récapitule les principaux minéraux évoqués.

Tableau 5 : Principaux minéraux évoqués dans le rapport

		Inosilicates				Phyllosilicates				Tectosilicates																		
Inosilicates à doubles chaînes : Super groupe des amphiboles		Inosilicates à simple chaîne et période triple		Inosilicates à simple chaîne et période quadruple	Inosilicates à triple chaîne et période quadruple	Phyllosilicates en feuillet 1:1 et anneaux à 6 membres : Groupe des serpentines		Phyllosilicates en feuillets modulé à bandes jointives		Tectosilicates du groupe des zéolites																		
Groupe, sous- groupe, série (selon la composition)	Minéraux	Groupe	Minéraux	Minéraux	Minéraux	Sous groupe	Minéraux	Groupe	Minéraux	Minéraux																		
Mg-Fe-Mn-Li	grunerite	wollastonite	wollastonite : 6 polytypes : 1A, 3A, 4A, 5A, 7A et 2M)	balangeroite : 2 polytypes 2M et 1A	carlostanite	amésite	amésite	palygorskite e	palygorskite (attapulgite)	chabazite																		
	amosite		gageite : 2 polytypes 2M et 1A	...	berthierine		...		erionite																			
	cummingtonite		brindleyite		sépiolite	sépiolite	mordenite																			
	anthophyllite						cronstedtite																			
	anthophyllite amiante						fraispointite																			
	edenite						guidottiite																			
	fluoro-edenite						kellyite																			
magnésio-hornblende	manandonite																									
actinolite	antigorite : 2 polytypes M et T					antigorite	antigorite			antigorite : 2 polytypes M et T	antigorite	antigorite	antigorite															
actinolite amiante	chrysotile					chrysotile	chrysotile			chrysotile	chrysotile	chrysotile	chrysotile															
ferro-actinolite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite	lizardite																		
trémolite											chrysotile																	
trémolite amiante											caryopillite																	
Na-Ca	richterite																											
winchite	greenalite										greenalite																	
Na	riebeckite																											
	crocidolite																			lizardite								
	arfvedsonite																			nepouite								
	magnésio- arfvedsonite																		
	glaucofane																		

En rouge : silicates fibreux classés cancérigènes avérés (catégorie 1) par le CIRC.

En orange : silicates pouvant se rencontrer sous forme fibreuse

... signifie que la liste est incomplète

* attapulgite : classé cancérigène possible (catégorie 2B) lorsque les fibres ont une longueur supérieure à 5µm.

- Les silicates cités dans ce rapport sont ceux cités dans les rapports de référence (NIOSH notamment) ou pour lesquels des données toxicologiques ont été retrouvés dans la base Pubmed. Sont aussi mentionnés quelques minéraux mentionnés dans le rapport à titre de référence pour la classification des espèces précédentes.
- A l'exception du groupe des serpentines, dont les espèces sont citées de manière exhaustive, les autres groupes ne sont décrits que partiellement. Dans chacun de ces groupes, coexistent des formes minérales fibreuses et non fibreuses.

6.5 Paramètres intrinsèques modulant la toxicité des fibres

Des multiples travaux publiés depuis une trentaine d'années ont tenté d'identifier des facteurs intrinsèques aux fibres susceptibles de prévoir leur toxicité potentielle. Cette discussion n'est pas tranchée à ce jour. Néanmoins, il est possible de dresser un état des lieux des connaissances relatives aux paramètres supposés participer à la toxicité d'une fibre dont la plupart ont été abordés dans les paragraphes précédents.

6.5.1 Critères dimensionnels

Sur le plan morphologique, les fibres présentent par définition, l'aspect de particules allongées à bords parallèles ayant une longueur supérieure ou égale à $5\mu\text{m}$, un diamètre inférieur à $3\mu\text{m}$ et un rapport longueur sur diamètre L/D supérieur à 3. C'est ce rapport qui définit une « fibre » (terme utilisé par le NIOSH : elongated particle), les variations des autres paramètres permettant de la définir sont (figure 2) :

- les fibres fines, dont le diamètre est inférieur à $0,2\mu\text{m}$ (FFA);
- les fibres courtes, de longueur inférieure à $5\mu\text{m}$ (FCA)

Ces dimensions semblent avoir été définies par rapport à des critères avant tout anatomiques, seules les particules de moins de $5\mu\text{m}$ étant réputées pouvoir atteindre l'alvéole pulmonaire. La figure 2 représente les différents types de fibres en fonction de leurs caractéristiques dimensionnelles.

fibres courtes d'amiante (FCA) : $L < 5 \mu\text{m}$, $D < 3 \mu\text{m}$ et $L/D > 3$

fibres fines d'amiante (FFA) : $L > 5 \mu\text{m}$, $D < 0,2 \mu\text{m}$ et $L/D > 3$ fibres mesurées en hygiène du travail (FRp, correspondant aux fibres OMS)²⁰

- Valeur limite d'exposition professionnelle sur 1 heure : 0,1 f/ml (100 f/L)
- Technique de mesure : MOCP
- Dimensions mesurées : $L > 5 \mu\text{m}$, $0,2 \mu\text{m} < D < 3 \mu\text{m}$ et $L/D > 3$

fibres mesurées en environnement général (FRg, correspondant aux fibres OMS + FFA) :

- Valeur réglementaire : 5 f/L
- Technique de mesure : META
- Dimensions mesurées : $L > 5 \mu\text{m}$, $D < 3 \mu\text{m}$ et $L/D > 3$

Les aires présentées dans la figure ne correspondent en aucun cas aux proportions réelles des différentes classes granulométriques des fibres d'amiante mesurées tant en environnement général que professionnel.

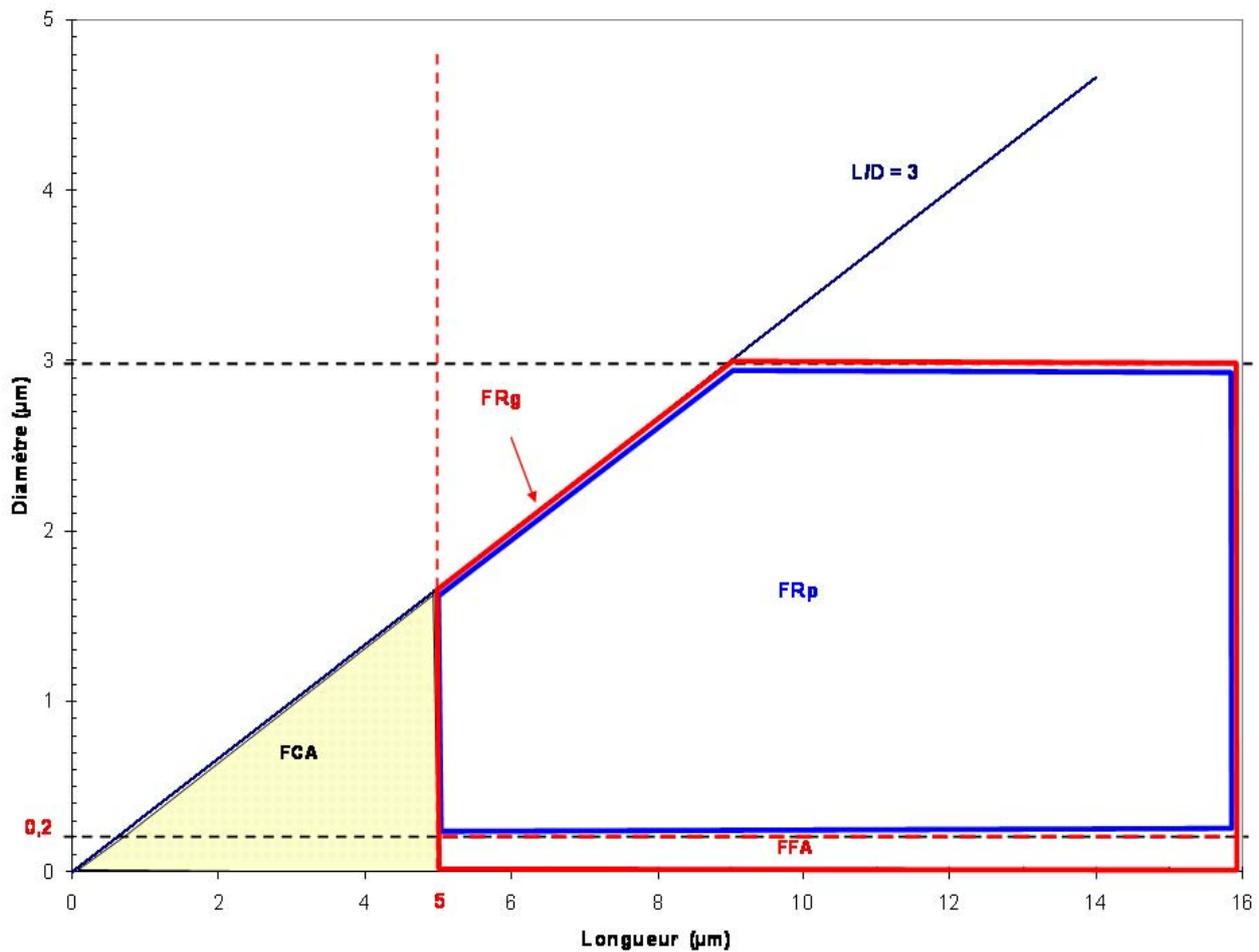


Figure 2 : Représentation des types de fibre d'amiante selon leurs caractéristiques dimensionnelles (Rapport Afsset, 2009)

²⁰ Avant le décret français du 4 mai 2012

L'influence des dimensions d'une fibre sur sa toxicité et en particulier sa cancérogénicité a été mise en évidence depuis les travaux de référence de Stanton. En quantifiant la survenue de cancers de la plèvre après implantation de particules de nature et de taille différentes dans l'espace pleural de rats femelles Osborne-Mendel, Stanton a mis en évidence une corrélation entre le risque cancérigène et le nombre de fibres de plus de 4µm de long pour moins de 1,5µm de diamètre, corrélation particulièrement significative pour les particules de plus de 8µm de long et de moins de 0,25µm de diamètre (Stanton *et al.*, 1981).

Le développement des nanotechnologies a permis de recréer de manière synthétique des fibres de dimensions et de compositions choisies. Ainsi, les travaux de Schinwald, de l'équipe de Murphy et Donaldson ont permis, à partir d'expérimentations à base de fibres de chrysotile synthétique calibrées, de confirmer l'existence d'un seuil dimensionnel à partir duquel les fibres induisent des réponses inflammatoires. Ce seuil varie de 4 µm pour la plèvre à 10 à 14 µm pour le tissu pulmonaire, cette différence étant attribuée aux différences de clairance des fibres, faible pour la plèvre où les fibres de longueur modérée peuvent obstruer les stomates pleuraux, meilleure au niveau pulmonaire grâce à l'action des macrophages (Schinwald *et al.*, 2012).

De nombreuses études ont depuis confirmé que les fibres longues et fines étaient plus toxiques que les fibres courtes et épaisses mais là encore sans qu'il soit possible d'affirmer l'innocuité des fibres courtes (Dodson *et al.*, 2003 ; Afsset, 2009).

6.5.2 Mécanismes physiopathologiques

Les mécanismes par lesquels les fibres longues augmentent la fréquence des tumeurs demeurent mal précisés. Dans des travaux de thèse, Yegles (Yegles *et al.* 2005) a mis en évidence des anomalies de la mitose et des altérations chromosomiques en relation avec la présence de fibres de plus de 8µm de longueur. Cet effet pourrait provenir d'un effet direct, mécanique, des fibres au niveau du fuseau mitotique mais plus probablement d'effets indirects liés à la sécrétion de divers médiateurs.

Ainsi, la littérature disponible souligne que, à diamètre égal, les fibres de plus de 20µm de long ne peuvent pas être phagocytées par les macrophages alvéolaires ce qui serait d'ailleurs une des raisons de la biopersistance des fibres d'amiante amphiboliques (Oberdorster, 2002).

Ces macrophages, dont la fonction est notamment de phagocyter les particules inhalées pour les « digérer » puis les éliminer, sont considérés comme jouant un rôle fondamental dans la toxicité des fibres. Lorsque le seuil dimensionnel de 20µm est dépassé, le macrophage émettrait un ensemble de médiateurs proinflammatoires (notamment ceux dérivés de l'acide arachidonique dont les prostaglandines PGE2) conduisant à la production de substances ayant une action génotoxique, comme les espèces actives dérivées de l'oxygène (EADO) ou de l'azote (EADN).

6.5.3 Morphologie des particules minérales

Évaluer l'importance de ce critère revient à déterminer si, à composition identique et pour une exposition similaire, la forme d'un minéral modifie sa toxicité et sa cancérogénicité. Le lien entre le caractère fibreux et la toxicité est admis depuis de nombreuses années et a été repris dans les avis antérieurs de l'AFSSET (2009) et par d'autres organismes d'évaluation (NIOSH, 2011 ; WHO, 1986).

Une question d'intérêt dans le cadre de cette saisine est de savoir si la morphologie des particules minérales répondant à la définition réglementaire d'une fibre influe sur sa toxicité. En d'autres termes, à dimensions égales, une fibre « asbestiforme » a-t-elle les mêmes effets biologiques qu'une fibre non asbestiforme (tels des cristaux ou fragments de clivage aciculaires), qu'il est pratiquement impossible de distinguer par les méthodes d'identification habituelles (Harper *et al.*, 2008) ?

Dans une étude sur culture de cellules trachéales de hamster syrien, une solution de fibres de crocidolite et, dans une moindre mesure, de chrysotile, a induit l'apparition d'une métaplasie alors que leurs homologues non fibreux, riébeckite et antigorite, n'ont pas eu cet effet (Woodworth *et al.*,

1983). La plupart des études disponibles, dont plusieurs ont été évoquées ci-dessus (Palekar *et al*, 1979 ; Mossman, 2008) confirment une moindre toxicité des formes non asbestiformes des amphiboles et des serpentines. Plusieurs autres revues de la littérature vont dans ce sens (Addison et McConnell, 2008 ; Gamble et Gibbs, 2008).

Parmi les propriétés des fibres asbestiformes, leur mode de clivage semble jouer un rôle majeur dans la toxicité de certaines fibres. Ainsi, les fibres longues de chrysotile, à la différence des amphiboles, ont une demi-vie relativement courte en milieu biologique, probablement du fait de mécanismes de fragmentation transversale. Néanmoins, leur capacité à se cliver longitudinalement en milieu biologique, en particulier acide, multiplie le nombre de fibres et augmente la surface totale des fibres disponible pour interagir avec l'environnement biologique. La demi-vie globale du chrysotile est cependant plus courte que celle des amphiboles car, ainsi clivés, les fragments de chrysotile seraient plus aisément phagocytés et éliminés. On perçoit donc que l'augmentation de la surface active est à mettre en balance avec la réduction éventuelle de la biopersistance des fibres.

Outre l'habitus de la particule minérale, l'aspect de sa surface pourrait moduler sa toxicité. Ainsi, la régularité de la surface de la fibre modifie non seulement la surface effective de la particule minérale (en μm^2) mais pourrait influencer sur ses interactions avec les cellules et les récepteurs membranaires (Fubini et Fenoglio, 2007).

Il semble acquis que les particules minérales asbestiformes sont plus toxiques que leurs analogues non asbestiformes, ce qui ne signifie pas que ces dernières soient démunies de toute toxicité.

6.5.4 Composition chimique

Composition de base

La composition type des silicates appartenant aux sous-classes des phyllo-, ino- et tecto-silicates ne semble pas influencer notablement sur la toxicité des fibres. Ainsi, parmi les « amiantes », le chrysotile et l'anthophyllite sont à base de magnésium, la trémolite et l'actinolite amiantes sont calciques, l'amosite est ferromagnésienne et la crocidolite est sodique.

Présence de fer

A l'inverse, la présence de fer dans la composition ou sur la surface des fibres d'amiante a été fréquemment évoquée comme un des facteurs de toxicité des fibres. Selon la synthèse faite dans le rapport de l'Afsset en 2009, le fer agirait en modifiant les propriétés oxydo-réductrices de surface des fibres. Il est à noter que le fer peut soit faire partie initialement de la composition de la fibre (jusqu'à des fractions massiques importantes pour la crocidolite par exemple), soit être déposé à la surface des fibres par les mécanismes de défense biologiques, comme on le retrouve sur les corps asbestosiques retrouvés dans les liquides de lavage bronchoalvéolaires des patients exposés à l'amiante.

Une étude de Turci en 2009 confirme a priori le rôle du fer comme étant l'un des cofacteurs de toxicité des fibres. En utilisant des fibres synthétiques de chrysotile, un effet toxique est apparu dès la première dose d'adjonction de fer. On notera que, dans cette étude, l'effet maximal a été obtenu pour la plus petite dose de fer, une augmentation de la dose de fer s'accompagnant de modifications de son incorporation dans la structure cristalline et de sa forme ionique (Turci *et al*, 2009).

Dans le cas de l'érianite, un silicate d'aluminium hautement carcinogène, Eborn et Aust (1995) avancent que le fer est en cause dans l'apparition de ruptures simple brin de l'ADN, sans que le mécanisme physiopathologique en jeu ne soit clairement précisé.

Plus que la quantité totale de fer adsorbé ou mobilisé par la fibre, c'est la quantité de fer réactif, disponible pour participer à la réaction de Fenton²¹, qui paraît déterminante (Fach *et al*, 2002). Cette hypothèse semble confirmée par l'étude de Giantomassi, au cours de laquelle un traitement thermique de fibres de chrysotile et d'amiante ciment à 1200°C s'accompagne d'une baisse notable de la toxicité des fibres sur des cellules A549. Ce traitement thermique a cependant pu modifier profondément la nature même des fibres (certaines fibres d'amiante commençant a priori à se transformer à partir de 800°C) (Giantomassi *et al*, 2010).

Présence d'autres métaux

Il existe peu d'études permettant d'évaluer l'influence de la présence d'autres atomes au sein de la structure moléculaire des fibres. Dans une étude *in vivo* sur des rats blancs (espèce non précisée), des fibres de nature amphibolique (de formule générale : $\text{Na}_2\text{X}_6\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) et différant uniquement par leur composition (magnésium, cobalt, nickel), ou avec substitution du silicium par du germanium, ont été administrées par voie intratrachéale (dose de 12,5 mg) pour évaluer le potentiel fibrogène et par injection intrapleurale (dose de 20 mg) pour évaluer l'effet carcinogène. Les amphiboles avec du silicium se sont avérées nettement plus fibrogènes que les amphiboles au germanium. Au sein des silicates, les formes substituées par du nickel ont conduit à une mortalité de 100%, ne permettant pas d'évaluer le potentiel fibrogène à long terme. Les formes substituées au cobalt étaient plus fibrogènes que celles au magnésium (Vasilewa *et al*, 1991).

Sur le plan de la cancérogénicité, les trois silicates ont induit l'apparition de mésothéliomes pleuraux, les fibres les plus actives étant celles au cobalt puis au magnésium. Les silicates au nickel ont induit deux fois moins de tumeurs mais elles comportaient également deux fois moins de fibres inhalables. Les silicates semblent donc plus toxiques que leurs homologues à base de germanium (germanates). Par contre, en terme de cancérogénicité, l'atome métallique ne semble moduler que modérément l'effet des amphiboles (Vasilewa *et al*, 1991).

6.5.5 Solubilité

La solubilité d'une fibre en milieu biologique influe directement sur sa biopersistance : plus une fibre est soluble, moins elle sera a priori biopersistante. Des techniques d'évaluation de la solubilité ont été développées (Bignon *et al*, 2000). Cette solubilité expliquerait par exemple la plus grande susceptibilité des fibres de chrysotile à des fractures transversales ainsi qu'à leur clivage longitudinal, plus marqué que pour les amphiboles, très peu solubles. Les fibres de chrysotile perdraient même leur pouvoir cancérogène après lixiviation acide (Monchaux *et al*, 1981).

L'impact de la biosolubilité sur la toxicité des fibres est également apparent pour d'autres familles de silicates, tels les silicates de calcium comme la wollastonite : très biosoluble dans les tissus pulmonaires, la wollastonite est très peu biopersistante ce qui explique sans doute sa moindre toxicité, comparativement à la crocidolite ou à la trémolite qui ne sont quasiment pas altérées en milieu biologique (Bellman et Muhle, 1994).

6.5.6 Clairance, durabilité et biopersistance

La durabilité d'une fibre en milieu biologique apparaît comme un facteur important conditionnant son pouvoir cancérogène. A partir d'une étude par inhalation de fibres de verre, de carbone et d'amosite, Miller a développé un modèle en régression logistique visant à prédire la survenue de cancers pulmonaires chez les spécimens exposés. Les deux meilleurs paramètres explicatifs ont été la constante de dissolution des fibres, en lien direct avec leur biopersistance, et le nombre de fibres de plus de 20µm de long (et moins de 1µm de diamètre) (Miller *et al*, 1999).

²¹ réaction intervenant entre les ions Fe^{2+} et l'eau oxygénée et conduisant à l'apparition d'espèces réactives de l'oxygène selon la réaction suivante : $\text{Fe}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+}_{(\text{aq})} + \text{OH}^-_{(\text{aq})} + \cdot\text{OH}^\circ$

La clairance des fibres, traduisant cette durabilité biologique, dépend donc de la capacité des défenses pleuro-pulmonaires à épurer les particules inhalées. Elle est différente au niveau alvéolaire et bronchique (où l'épuration s'effectue par les cellules macrophagiques et la clairance mucociliaire) et au niveau pleural, où les fibres de plus de 4µm obstruent les stomates et déclenchent un processus inflammatoire.

La biopersistance d'une fibre est donc en lien avec plusieurs paramètres évoqués précédemment :

- des critères dimensionnels, les macrophages ne pouvant traiter les fibres de plus de 20µm (et avec difficulté celles de plus de 8µm) ;
- des critères chimiques en lien avec leur solubilité en milieu biologique, les fibres solubles subissant une dégradation suffisante pour permettre le traitement des fragments résiduels par les macrophages ;
- un critère quantitatif, la capacité d'épuration des poumons étant limitée et pouvant être dépassée en cas d'exposition massive. Un phénomène équivalent survient lorsque des particules asbestiformes se clivent longitudinalement, la réduction du diamètre s'accompagnant d'une multiplication des particules fibreuses, cas typique du chrysotile (Merchant, 1990).

6.6 Mécanismes d'action toxique

La physiopathologie des cancers induits par les fibres d'amiante et les autres silicates cancérigènes est complexe et demeure mal comprise. Les mécanismes génotoxiques en cause dans les effets des amiantes ont fait l'objet de nombreux travaux, synthétisés dans une étude récente (Barlow *et al*, 2013). Plusieurs évènements semblent pouvoir être en cause, la liste fournie ici ne prétendant pas être exhaustive:

- la perturbation directe, mécanique, de la séquence mitotique par les fibres vulnérantes. Ce mécanisme semble cependant avoir été infirmé par certaines études (Huang *et al*, 2011) ;
- un phénomène de génotoxicité dite primaire, liée à la réactivité de surface des fibres, via la production d'EADO par la réaction de Fenton, mettant en œuvre les atomes de fer ou plus précisément les ions Fe^{2+} (exogènes ou endogènes) adsorbés sur les fibres. Ces espèces réactives de l'oxygène générant des atteintes de l'ADN si les mécanismes de protection anti-oxydants sont dépassés ;
- des mécanismes génotoxiques dits secondaires. La phagocytose contrariée des fibres (en particulier des fibres trop longues (plus de 8 µm et surtout plus de 20µm) ou trop nombreuses par les macrophages qui émettraient alors des signaux proinflammatoires et l'apparition là encore d'EADO et/ou d'EADN. Bien que cela soit encore discuté, ce mécanisme, nécessitant une durabilité biologique des fibres suffisantes pour entretenir un phénomène inflammatoire, pourrait être à seuil ;
- la stimulation de diverses voies enzymatiques par activation (directe ou indirecte) de récepteurs membranaires, venant modifier le métabolisme et le cycle cellulaire. Ces mécanismes enzymatiques conduiraient soit à l'activation de la prolifération cellulaire soit à des phénomènes apoptotiques, soit à des réactions plus complexes, comme dans le cas de l'ériionite, qui conduit à une élévation du rapport prolifération cellulaire / apoptose.

L'ensemble de ces mécanismes, décrits à des degrés divers pour les amiantes, semble intervenir également pour les silicates non classés amiantes évoqués ci-dessus, en particulier dans leur présentation asbestiforme.

Points clés

Les facteurs intrinsèques influant la toxicité des fibres minérales sont multiples, et leur part respective n'est pas clairement mesurée. Au-delà des critères dimensionnels (longueur, diamètre, rapport d'allongement, surface) entrent en compte la solubilité, le potentiel de déposition et de clairance, conditionnant leur biopersistance ou plus exactement leur durabilité en milieu biologique, ainsi que leur composition et leur réactivité, dont dépendent la majorité des réponses biologiques. La part respective de ces différents paramètres sur la toxicité, en particulier la cancérogénicité, des fibres n'est pas connue et varie sans doute d'une fibre à une autre. Donaldson estime néanmoins que le paradigme de la pathogénicité des fibres est fondé sur une robuste relation structure/activité qui permet la prédiction de la pathogénicité des fibres dépendant de leur longueur, de leur épaisseur et de leur biopersistance (Donaldson *et al*, 2013).

En outre, au-delà des propriétés intrinsèques des fibres, les conditions d'exposition influent assurément sur le développement des phénomènes toxiques. Ainsi, il est probable que l'exposition répétée ou chronique à des fibres ayant une demi-vie courte peut conduire à des effets comparables à ceux obtenus par des expositions ponctuelles à des fibres biopersistantes.

Si les particules minérales asbestiformes possèdent un ensemble de caractéristiques morphologiques, physiques, chimiques leur conférant une toxicité supérieure à celle de leurs analogues non asbestiformes et *a fortiori* non fibreux, les données compilées ne permettent pas d'écarter tout risque cancérogène potentiel de la part d'un certain nombre de particules fibreuses non classées amiantes.

7 Conclusion

En Nouvelle-Calédonie, des occurrences à antigorite sont connues dans trois unités géologiques (Diahot, Boghen, Nappe des péridotites). Cependant, les études de caractérisation minéralogique, de contexte géologique, et d'occurrence sont particulièrement dédiées à la Nappe des péridotites en contexte d'extraction minière, qui couvre à elle seule un tiers de la surface de la Grande Terre.

Dans la nappe des péridotites, les occurrences à antigorite sont connues dans presque tous les massifs (mines), avec cependant des fréquences très variables d'un massif, à l'autre ou même d'un secteur à l'autre d'un même massif. Ces occurrences correspondent à des veines d'épaisseur centimétrique à décimétrique, décrites sous la dénomination de « plan à antigorite » ou de « plan à cristallisations fibro-lamellaires ». Les analyses réalisées à partir de ces structures ont montré d'une part que du chrysotile est associé d'une manière très étroite, et presque systématique, aux veines d'antigorite, et d'autre part que des assemblages à trémolite-amiante + antigorite existent. Dès lors, il peut apparaître logique de considérer ces structures à antigorite comme des structures amiantifères et de les traiter comme telles.

Soumis à l'altération, ces veines à antigorite se désagrègent en un matériau blanchâtre, constitué par un mélange de fibres très fines, et de fragments rigides correspondant à des particules plus ou moins plates et hétérométriques d'antigorite (« amas fibro-lamellaires »). Les données analytiques obtenues à partir de ces structures à antigorite très altérées et *pro parte* désagrégées montrent que la fraction la plus fine des particules minérales observées possède des caractéristiques morphométriques qui sont celles des fibres inhalables au sens de l'OMS.

Les études expérimentales relatives à la toxicité de l'antigorite (aussi bien les études *in vitro* que les études *in vivo*) sont rares et ne permettent pas d'évaluer sa toxicité. Ainsi, seules 7 études ont été recensées :

- les 4 premières sont des études relativement anciennes, et portent sur les effets de l'antigorite sur des cellules en culture. L'antigorite utilisée est de forme non fibreuse, et a été utilisée comme « témoin minéral non fibreux » en comparaison de deux minéraux fibreux classés amiante : le chrysotile et la crocidolite. Les résultats sont en faveur d'une activité toxique de l'antigorite non fibreuse faible sinon nulle.
- deux autres études, plus récentes, portent sur les effets de l'antigorite fibreuse sur des cellules en culture. Dans ces études, les auteurs n'ont pas comparé l'activité cytotoxique à celle obtenue par l'antigorite non fibreuse, mais uniquement à celle obtenue avec des cellules témoins non exposées d'une part, et avec des cellules exposées à la crocidolite d'autre part. Elles montrent que l'antigorite fibreuse est cytotoxique à forte dose, sans qu'il ne soit possible d'exclure que cet effet corresponde à un « effet fibre » non spécifique de cette espèce minérale.
- la dernière étude est une étude *in vivo*. Elle montre un effet cancérigène après injection intrapéritonéale d'un extrait minéral contenant de l'antigorite à des rats et des souris. Cependant, on ne peut attribuer formellement cet effet aux fibres d'antigorite dans la mesure où les extraits minéraux utilisés contiennent d'autres minéraux potentiellement cancérigènes.

Une seule étude épidémiologique relative à l'antigorite a été retrouvée dans la littérature. Cette étude, de type écologique, avait comme objectif de tester les éventuelles relations entre la survenue de mésothéliomes au sein des populations vivant en Nouvelle-Calédonie et différents facteurs de risque environnementaux. Cette étude met en avant la présence de serpentines sans toutefois confirmer ou infirmer que l'antigorite soit en elle-même un facteur de risque du mésothéliome.

Une revue des données de la littérature sur la toxicité des autres fibres minérales non classées « amiantes », et appelées d'une façon générique particules minérales allongées (PMA), a permis de faire le point sur les différents facteurs influençant leur toxicité. Il apparaît ainsi que la part

respective de ces facteurs est encore loin d'être élucidée. Il en est ainsi aussi bien des critères dimensionnels de ces PMA (longueur, diamètre, rapport d'allongement, surface) que des autres critères relatifs à leurs propriétés physico-chimiques (solubilité, potentiel de déposition et de clairance, de biopersistance, et de réactivité de surface). De même, le caractère asbestiforme ou non de ces PMA, n'a pas été retenu par la plupart des auteurs, comme un critère discriminant de toxicité.

En conclusion, il convient de retenir que :

- les données géologiques et minéralogiques de Nouvelle-Calédonie montrent que le chrysotile et la trémolite (dont la trémolite amiante) sont associés de manière étroite à l'antigorite.
- les données de toxicité spécifique à l'antigorite sont très insuffisantes et ne permettent ni d'affirmer, ni d'infirmer son potentiel toxique. De plus, ces données ne distinguent pas les effets de l'antigorite fibreuse en comparaison de ceux de l'antigorite non fibreuse.
- les données sur les effets toxiques des PMA, dont font partie les formes fibreuses d'antigorite, ne permettent pas d'apporter des éléments prédictifs validés sur une éventuelle toxicité de l'antigorite fibreuse.

Concernant la situation particulière de la Nouvelle-Calédonie, il convient d'examiner les possibilités de faire une campagne de reconnaissance plus fine des occurrences des serpentines (essentiellement de l'antigorite et du chrysotile) et de la trémolite, en utilisant les techniques les plus récentes d'identification des fibres minérales. Cette actualisation plus fine de la cartographie pourrait permettre de hiérarchiser les différentes zones de danger en fonction de la nature des fibres existantes, et ainsi de mieux cibler les campagnes de métrologie et de prévention.

Dans le cas où il est avéré que l'antigorite fibreuse, non liée à des fibres d'amiante, est retrouvée dans certaines zones, il sera très utile d'encourager des études de toxicité conformes aux bonnes pratiques recommandées actuellement.

Au delà de la problématique propre à l'antigorite en Nouvelle-Calédonie, il est souhaitable de reconsidérer l'approche actuelle des particules minérales (et plus précisément des silicates fibreux), qui est actuellement basée sur la dénomination commerciale de l'amiante, et qui ne rend aucunement compte à elle seule du champ des particules potentiellement cancérogènes. Dans ce cadre, l'utilisation de la possibilité offerte par les nanotechnologies de produire des fibres de composition et de dimensions maîtrisées, peut permettre le développement de nouvelles études de toxicité expérimentale assurant une meilleure comparabilité et reproductibilité des résultats.

8 Bibliographie

8.1 Publications

Adamis Z, Tatrai E, Honma K & al (2000) *In vitro* and *in vivo* tests for determination of the pathogenicity of quartz, diatomaceous earth, mordenite and clinoptilolite. *Ann Occup Hyg*, 44, 67-74.

Addison J, Mc Connell EE, (2008) A review of carcinogenicity studies of asbestos and non-asbestos tremolite and other amphiboles. *Regul Toxicol Pharmacol.*; 52:S187-99.

Afsset (2009) Les fibres courtes et les fibres fines d'amiante. Prise en compte du critère dimensionnel pour la caractérisation risques sanitaires liés à l'inhalation d'amiante. Rapport d'expertise collective.

Andreani M., Mével, C., Boullier, A. M., and Escartín, J. (2007) Dynamic control on serpentine crystallization in veins: Constraints on hydration processes in oceanic peridotites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8, Q02012.

Andreozzi B.A., Ballirano P., Bruni B.M., Gianfagna A., Gunter M.E., Mazziotti-Taglian S., Pacella A., Paoletti L., Le R.J., Van Orden D.R., Allison K. (2007). Fibrous amphiboles from Biancavilla: Crystal chemistry, environmental aspects, and health studies: Reviews in Mineralogy and Geochemistry (RiMG), Amphiboles Shortcourse, Rome, Italy.

Anses (2010) Affleurements naturels d'amiante. Etat des connaissances sur les expositions, les risques sanitaires et les pratiques de gestion en France et à l'étranger. Rapport d'expertise.

Anses (2012) Evaluation des risques relatifs au talc seul et au talc contaminé par des fibres asbestiformes et non asbestiformes, Rapport d'expertise collective.

ATSDR (2001) Toxicological profile for asbestosis

Bandli B.R., Gunter M.E., Twamley B., Foit F.F. Cornelius S.B. (2003) Optical, compositional, morphological, and x-ray data on eleven particles of amphibole from Libby, Montana, USA. *Canadian Mineralogist*, 41, 1241–1253.

Bard T, Yarwood J. & Tylee B. (1997) Asbestos fiber identification by Raman microspectroscopy. *J. Raman Spectrosc.* 28, 803-809.

Baris YI (1991). "Fibrous zeolite (erionite) - related diseases in Turkey". *American Journal of Industrial Medicine*, 19 (3), 374–378

Baris YI, Grandjean P. (2006) Prospective study of mesothelioma mortality in Turkish villages with exposure to fibrous zeolite. *J Natl Cancer Inst.*; 98:414-7.

Baris YI, Saracci R, Simonato L & al (1981) Malignant mesothelioma and radiological chest abnormalities in two villages in Central Turkey An epidemiological and environmental investigation. *Lancet*; 1:984-7.

Baris YI, Simonato L, Artvinli M & al (1987) Epidemiological and environmental evidence of the health effects of exposure to erionite fibres: a four-year study in the cappadocian region of Turkey. *Int J Cancer*, 39:10-17.

Baris, Y.I., Sahin, A.A., Ozesmi, M., Kerse, I., Ozen, E., Kolacan, B., Altinors, M., Goktepel, A., (1978). An outbreak of pleural mesothelioma and chronic fibrosing pleurisy in the village of Krain.Urgüp in Anatolia. *Thorax*, 33, pp. 181-192.

Baris Y.I., Artvinli M., Sahin A.A., Bilir N., Kalyoncu F., Sebastien P. 1988. Non-occupational asbestos related chest diseases in a small Anatolian village. *British J. of Indus. Med.*, 45, 841-842.

- Barlow CA, Lievense L, Gross S, Ronk CJ, Paustenbach DJ. (2013) The role of genotoxicity in asbestos-induced mesothelioma: an explanation for the differences carcinogenic potential among fiber types. *Inhal Toxicol.*; 25 (9): 553-67.
- Baronnet, A. & Belluso, E., 2002. Microstructures of the silicates: key information about mineral
- Baronnet, A. & Devouard, B., 1996. Topology and crystal growth of natural chrysotile and polygonal serpentine. *Journal of Crystal Growth*, 166, 952-960
- Baumann F. Le mésothéliome malin pleural en Nouvelle-Calédonie : analyse spatiale et déterminants environnementaux – facteurs de risque d'exposition à l'amiante naturel. Thèse soutenue le 12 octobre 2010 (Université de la Nouvelle Calédonie)
- Baumann F, Maurizot P, Mangeas M, Ambrosi JP, Douwes Jand Robineau B. Pleural mesothelioma in new Caledonia: Associations with environmental risk factors. *Environ Health Perspect* 119:695-700 (2011).
- Baumann F., Maurizot P., Robineau B., Ambrosi J.P., 2007a. Facteurs de risque du mésothéliome en Nouvelle-Calédonie : données épidémiologiques et géologiques. Confrontation des données épidémiologiques et géologiques. Rapport du Ministère de l'Outre Mer, 94pp
- Baumann, F., Rougier, Y., Baumann F, Rougier Y. Registre des cancers en Nouvelle-Calédonie, bilan de 15 années de surveillance, 1989-2003. *BEH n°34/2005* :171-173
- Baumann, F., Rougier, Y., Ambrosi, J. P., and Robineau, B. P., 2007b. Pleural mesothelioma in New Caledonia: An acute environmental concern. *Cancer Detection and Prevention*, 31, 70 - 76.
- Belluso, E. and Ferraris G., 1991. New data on balangeroite and carlosturanite from alpine serpentinites. *Eur. J. Mineral*, 3, 559-566
- Bellman B, Muhle H: Investigation of the biodurability of wollastonite and xonotlite. *Environ Health Perspect*. 1994; 102:191-195.
- Bertino P, Marconi A, Palumbo L & al: Erionite and asbestos differently cause transformation of human mesothelial cells. *Int J Cancer* 2007;12:12-20.
- Berzelius, J.J., 1819. Nouveau système de minéralogie (Trad. du suédois). Méguignon-Marvis Ed., Paris, 314pp.
- Biggeri A, Pasetto R, Belli S & al : Mortality from chronic obstructive pulmonary disease and pleural mesothelioma in an area contaminated by natural fiber (fluoro-edenite). *Scand J Work Environ Health*. 2004; 30:249-52.
- Bignon J, Habert C, Redjidal Y. Inventaire des fibres de substitution à l'amiante. *Arch Mal Prof*, 2000 ; 61 : 75-94.
- Boman, G., Schubert, V., Svane, B., Westerholm, P., Bolinder, E., Rohl, A.N., Fishbein, A. (1982). Malignant mesothelioma in Turkish immigrants in Sweden. *Scand. J. Work Environ. Health*. 8, pp. 108-112.
- Bonaccorsi, E., Ferraris, G., Merlino, S., 2012. Crystal structure of 2M and 1A polytypes of balangeroite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 227, 460-467.
- Boulmier J. L., 2009. Expertise indépendante sur l'amiante dans la chaîne de production minière - Mission préparatoire. BRGM/RP-57421-FR, Rapport, 149p.
- Boulmier J. L., 2010. Examen d'un échantillon d'antigorite prismatique altérée, à l'état brut et après broyage ménagé. Projet PSP10NCL05/1, Octobre 2010, 10p.
- BRGM-LEPI-INSERM Rapport de la mission du 23 avril au 4 mai 2007, Amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie, Recommandations concernant les mesures de réduction du risque et l'évaluation du risque sanitaire. 56 pages, 2 annexes.

- Brindley, G. W. and Souza Santos, P., 1971. Antigorite - Its occurrence as a clay mineral. *Clays and Clay Minerals*, 19, 187-191.
- Bruni B.M., Pacella A., Mazzotti Tagliani S., Gianfagna A., Paoletti L. 2006. Nature and extent of the exposure to fibrous amphiboles in Biancavilla. *Sci. Total Environ.* 370, 9–16.
- Burrigato F., Comba P., Baiocchi V., Palladino D.M., Simei S., Gianfagna A., Paoletti L., Pasetto R. 2005. Geo-volcanological, mineralogical and environmental aspects of quarry materials related to pleural neoplasm in the area of Biancavilla, Mount Etna (Eastern Sicily, Italy): *Environmental Geology*, 47, 855–868.
- Cambelova M, Juck A: Fibrogenic effect of wollastonite compared asbestos dust and dusts containing quartz. *Occup Environ Med* 1994; 51:343-346.
- Capitani, G. & Mellini, M., 2004. The modulated crystal structure of antigorite: The $m = 17$ polysome. *American Mineralogist*, **89**, 147-158
- Capitani, G. C. & Mellini M., 2006. The crystal structure of the $m = 16$ antigorite polysome, by single crystal synchrotron diffraction. *American Mineralogist*, **91**, 394–399.
- Cardile V, Lombardo L, Belluso E & al: Fluoro-edenite fibers induce expression of Hsp70 and inflammatory response. *Int J Environ Res Public Health*. 2007;4:195-202.
- Case BW, Abraham JL, Meeker G & al. Applying definitions of "asbestos" to environmental and "low-dose" exposure levels and health effects, particularly malignant mesothelioma. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*. 2011;14:3-39.
- Cattaneo A, Somigliana A, Gemmi M, Bernabeo F Savoca D, Cavallo DM, Bertazi PA. Airborne concentrations of chrysotile asbestos in serpentine quarries and stone processing facilities in Valmalenco, Italy. *Ann Occup Hyg*. 2012 ; 56 (6): 671-83.
- Choi SJ, Oh JM, Choy JH. Toxicological effects of inorganic nanoparticles on human lung cancer A548 cells. *J Inorg Biochem*. 2009; 103 (3): 463-71.
- Christy A. Barlow, Laura Lievense, Sherilyn Gross, Christopher J. Ronk, and Dennis J. Paustenbach. *Inhalation Toxicology*. 2013; 25 (9): 553-567.
- Clark TC, Harrington VA, Asta J & al : Respiratory effects of exposure to dust in taconite mining and processing. *Am Rev Respir Dis*. 1980 ;121:959-66.
- Clinkenbeard, J.P., Churchill, R.K. and Lee, K., 2002. Guidelines for geologic investigations of naturally occurring asbestos in California. California Dpt Conserv., California Geol. Surv. Special Publication, 124, 70pp.
- Coats C.J.A., 1968. Serpentine minerals from Manitoba. *The Canadian Mineralogist*, 9(3): 322-347.
- Coleman R.G., 1971. Petrologic and geophysical nature of serpentinites. *Geological Society of America Bulletin*, 82(4): 897-918.
- Collan Y, Kosma VM, Anttonen H & al. Toxicity of richterite in hemolysis test and macrophage cultures. *Arch Toxicol Suppl*. 1986; 9:292-5.
- Comba P, Gianfagna A, Paoletti L: Pleural mesothelioma cases in Biancavilla are related to a new fluoro-edenite fibrous amphibole. *Arch Environ Health*. 2003;58:229-32.
- Compagnoni R., Ferraris L., Fiora L. 1983. Balangeroite, a new fibrous silicate related to gageite from Balangero, Italy. *American Mineralogist*, Volume 68, 214-219.
- Compagnoni R., Ferraris G., Mellini M. 1985. Carlosturanite, a new asbestiform rock-forming silicate from Val Varaita, Italy. *American Mineralogist*, 70, 767-772.
- Compagnoni *et al* 1980 à compléter (page 30 du rapport)

- Coombs, D.S., A. Alberti, T. Armbruster, G. Artioli, C. Colella, E. Galli, J.D. Grice, F. Liebau, J.A. Mandarino, H. Minato, E.H. Nickel, E. Passaglia, D.R. Peacor, S. Quartieri, R. Rinaldi, M. Ross, R.A. Sheppard, E. Tillmans & G. Vezzalini, 1997. Recommended nomenclature for zeolite minerals: Report of the Subcommittee on Zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *Canadian Mineralogist*, **35**, 1571-1606
- Debret, B., Nicollet, C., Andreani, M., Schwartz, S., and Godard, M., 2013. Three steps of serpentinization in an eclogitized oceanic serpentinization front (Lanzo Massif – Western Alps). *Journal of Metamorphic Geology*, **31**, 165-186.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1962. Rock forming mineral - Vol.3 - Sheet silicates. Longmann Group Limited, London, 270pp
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals, 2nd edition. Longman Scientific & Technical, Harlow
- Deer, W. A., Howie, R.A., Zussman, J., 2009. Rock-Forming Minerals, Volume 3B. Layered Silicates Excluding Micas and Clay Minerals. Geological Society, London, 314 pp
- DIMENC-SGNC & BRGM, 2011. Cartographie des terrains potentiellement amiantifères en Nouvelle-Calédonie - Etat des connaissances, mars 2010, DIMENC-SGNC, BRGM (A3) (PDF)
- Dodson RF, Atkinson MA, Levin JL. (2003). Asbestos fiber length as related to potential pathogenicity: a critical review. *Am J Ind Med.* 44(3) : 291-297.
- Dogan M., 2013 Paper No. 57-2 “Non-regulatory” asbestos group minerals positive identifications for international regulatory agencies in Session No. 57 :Environmental Exposure to Asbestos and Other Natural Fibers in 2013 Conference of the International Medical Geology Association (25–29 August 2013); <https://gsa.confex.com/gsa/2013MED/webprogram/Paper221991.html>
- Dogan A.U., Dogan M., Hoskins JA, 2008. Erionite series minerals : mineralogical and carcinogenic properties. *Environ. Geochem. Health*, 30, 4 :367-381.
- Donaldson K¹, Poland CA, Murphy FA, MacFarlane M, Chernova T, Schinwald A: Pulmonary toxicity of carbon nanotubes and asbestos - similarities and differences. *Adv Drug Deliv Rev.* 2013;65(15):2078-86
- Eborn SK, Aust AE: Effect of iron acquisition on induction of DNA single-strand breaks by erionite, a carcinogenic mineral fiber. *Arch Biochem Biophys.*1995; 16:507-514.
- Enrico Favero-Longo S, Turci F, Tomatis M & al: The effect of weathering on ecopersistence, reactivity, and potential toxicity of naturally occurring asbestos and asbestiform minerals. *J Toxicol Environ Health A.* 2009; 72:305-14.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Method for the Determination of Asbestos in bulk building Materials. EPA-600/R-93/116, July 1993 <http://www.rti.org/pubs/Test-Method-for-Determination.pdf>
- Evans, B. W., Hattori, K., Baronnet A., 2013. Serpentinite : What, Why, Where ? *Elements*, **9**, 99-106
- Evans, B.W. & Tromsdorff, V., 1978. Petrogenesis of garnet Iherzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. *Earth and Planetary Science Letters*, **39**, 55–71.
- Evans, B.W., 2004. The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable. *International Geology Review*, **46**, 479–506.
- Fach E, Kristovich R, Long JF & al: The effect of iron on the biological activities of erionite and mordenite. *Environ Int.* 2003; 29:451-8.
- Fach E, Waldman WJ, Williams M & al: Analysis of the biological and chemical reactivity of zeolite-based aluminosilicates fibers and particulates. *Environ Health perspect.* 2002;110:1087-1096.

- Fitz Gerald, J. D., Eggleton, R. A., and Keling, J. L., 2010. Antigorite from Rowland Flat, South Australia: asbestiform character. *European Journal of Mineralogy* **22**, 525-533.
- Foucault, A. & Raoult, J.F., 2010. Dictionnaire de Géologie, 7ème éd. Dunod éd., Paris, 382 pp.
- Fubini B, Fenoglio I: Toxic potential of mineral dusts. *Elements*. 2007; 3:407-414.
- Gaines R. V., Skinner C. H., Foord E. E., Mason B. and Rosenzweig A., 1997. Dana's New Mineralogy : the system of mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana, 8th Ed., John Wiley & Sons, 1819 pp
- Gamble JF, Gibbs GW. : An evaluation of the risks of lung cancer and mesothelioma from exposure to amphibole cleavage fragments. *Regul Toxicol Pharmacol*. 2008; 52:S154-86.
- García-Romero, E. & Suárez, M., 2010. On the chemical composition of sepiolite and palygorskite. *Clays and Clay Minerals*, **58**, 1-20.
- Gazzano E, Riganti C, Tomatis M & al: Potential toxicity of nonregulated asbestiform minerals: balangeroite from the western Alps. Part 3: Depletion of antioxidant defenses. *J Toxicol Environ Health A*. 2005; 68:41-9.
- Gianfagna A., Oberti R. 2001. Fluoro-edenite from Biancavilla (Catania, Sicily, Italy): crystal chemistry of a new amphibole end-member. *American Mineralogist*, 83, 486-493.
- Giantomassi F. Gualteri AF, Santarelli L, Tomastti M, Lusvardi G, Lucarini G, Governa M, Pugnali A. Biological effects and comparative cytotoxicity of thermal transformed asbestos-containing materials in a human alveolar epithelial cell line. *Toxicology in vitro*. 2010; 24 1521-1531.
- Gibbs, A. R., 1990. Role of asbestos and other fibres in the development of diffuse malignant mesothelioma. *Thorax*, 49(9), 649-654
- Goldberg M, Banaei A, Goldberg S, Auvert B, Luce D, Guéguen A. Past occupational exposure to asbestos among men in France. *Scand J Work Environ Health* 2000;26(1):52-61.
- Goldberg P, Goldberg M, Leclerc A, Chastang JF, Marne MJ, Dubourdieu D. A 10-years incidence survey of respiratory cancer and a case-control study within a cohort of nickel mining and refining workers in New Caledonia . *Cancer Causes control* 1994;5:15-25.
- Goldberg P, Goldberg M, Marne MJ, Hirsch A, Tredaniel J. Incidence of pleural mesothelioma in New Caledonia: A 10 years survey (1878-1987). *Arch Environ Health* 1991;46:306-9.
- Grobéty, B., 2003. Polytypes and higher-order structures of antigorite: A TEM study. *American Mineralogist*, **88**, 27-36.
- Groppo C, Tomatis M, Turci F & al: Potential toxicity of nonregulated asbestiform minerals: balangeroite from the western Alps. Part 1: Identification and characterization. *J Toxicol Environ Health A*. 2005; 68:1-19.
- Groppo, C. and Compagnoni, R., 2007. Ubiquitous fibrous antigorite veins from the Lanzo Ultramafic Massif, Internal Western Alps (Italy): characterisation and genetic conditions. *Periodico di Mineralogia*, **76**, 169-181.
- Groppo, C., Rinaudo, C., Cairo, S., Gastaldi, D., and Compagnoni, R., 2006. Micro-Raman spectroscopy for a quick and reliable identification of serpentine minerals from ultramafics. *European Journal of Mineralogy*, **18**, 319-329.
- Gualtieri AF, Cavenati C, Zanatto I, Meloni M, Elmi, G, Gualtieri ML. The transformation sequence of cement-asbestos states up to 1200°C and safe recycling of the reaction product in stoneware tile mixtures. *J. Hazard. Mater.* 2008B; 152, 563-570.
- Gunter M.E., Dyar M.D., Twamley B., Foit F.F., Cornelius S. 2003. Crystal chemistry and crystal structure of amphibole and amphibole-asbestos from Libby, Montana, U.S.A. *American Mineralogist*, 1944-1952.

- Gunter, M.E., Belluso, E. and Mottana, A., 2007. Amphiboles: environmental and health concerns. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67(1): 453-516.
- Guthrie, G.D., 1992. Biological effects of inhaled minerals. *American Mineralogist*, 77(3-4): 225-243.
- Gylseth B, Norseth T, Skaug V: Amphibole fibers in a taconite mine and in the lungs of the miners. *Am J Ind Med*, 1981;2:175-84.
- Harper M, Lee EG, Doorn SS & al: Differentiating non-asbestiform amphibole and amphibole asbestos by size characteristics. *J Occup Environ Hyg*. 2008; 5: 761-70.
- Hendrickx, M., 2009. Naturally occurring asbestos in eastern Australia: a review of geological occurrence, disturbance and mesothelioma risk. *Environmental Geology*, 57(4): 909-926.
- Houchot, M. A., 2008. De l'évaluation en santé publique à une démarche de géographie de la santé: Le risque amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie. Thèse de l'Université de Nouvelle-Calédonie, Nouméa, 281pp.
- Huang SX, Jaurand MC, Kamp DW, *et al.* Role of mutagenicity in asbestos fiber-induced carcinogenicity and other diseases. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 2011;14: 179-245.
- IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemicals to human (1987) Silica and some silicates, 42.
- IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemicals to human (1997). Silica, Some Silicates, Coal Dust and Para-Aramid Fibrils, 68
- IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemicals to human (2002) Man-made vitreous fibres, 81
- IARC Monographs on the evaluation of the Carcinogenic Risks to Humans (2010) Carbon black, titanium dioxide and talc, 93.
- IARC Monographs on the evaluation of the carcinogenic risks of chemicals to human (2012) Arsenic, metals, fibres, and dusts, 100 C
- IMA International Mineralogical Association (2013) IMA database of mineral properties. <http://rruff.info/ima/> last consultation, 15
- IMA, The new IMA list of minerals a work in progress (2013-10) Updated october 2013. [http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/IMA_Master_List_\(2013-10\).pdf](http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/IMA_Master_List_(2013-10).pdf)
- Imbernon E, Bonenfant S, Goldberg M, *et al.* Estimation de la prévalence de l'exposition professionnelle à l'amiante des retraités récents (1994-1996) du régime général de Sécurité sociale. *Bull Epidemiol Hebd* 1999;50.
- InVS (2010). Des indicateurs en santé travail – Risques professionnels dus à l'amiante. Saint Maurice : Institut de veille sanitaire ; 2010. 23p. Disponible à partir de l'URL : www.invs.sante.fr
- InVS (2012) Modélisation de l'évolution de la mortalité par mésothéliome de la plèvre en France. Projections à l'horizon 2050.
- Kamp DW, Greenberger MJ, Sbalchierro JS, Preuen SE, Weitzman SA. Cigarette smoke asbestos-induced alveolar epithelial cell injury: role of free radicals. *Free Radic Biol Med*. 1998; 25 (6): 728-39.
- INSERM (1999) Effets sur la santé des fibres de substitution à l'amiante. Expertise collective.
- INSERM (2008) Cancers et environnement. Expertise collective
- Kanarek MS. Mesothelioma from chrysotile asbestos: update. *Ann Epidemiol*. 2011; 21 (9): 688-97.

- Keeling J.L., Raven M.D., McClure S.G. 2006. Identification of fibrous mineral from Rowland Flat area, south Australia. Department Primary Industries and Resources, South Australia. Report book, 2006/02.
- Keeling, J. L., Raven, M. D., and Self, P. G., 2010. Asbestiform antigorite – implications for the risk assessment of fibrous silicates. *21st Australian Clay Minerals Conference*, Brisbane, QLD.
- Keeling, J. L., Raven, M. D., Self, P. G., and Eggleton, R. A., 2008. Asbestiform antigorite occurrence in South Australia. *Proceedings 9th International Congr. Appl. Mineralogy ICAM08*, Brisbane, QLD.
- King, T. V. V. and Clark, R. N., 1989. Spectral characteristics of chlorites and Mg-serpentine using high-resolution reflectance spectroscopy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **94**, 13997-14008.
- Kleymenova EV, Horesovsky G, Pylev LN & al: Mesotheliomas induced in rats by the fibrous mineral erionite are independent from p53 alterations. *Cancer Lett.* 1999; 147:55-61.
- Kliment C.R., Clemens K., Oury T.D. 2009. North american erionite-associated mesothelioma with pleural plaques and pulmonary fibrosis : a case report. *Int. J. Clin. Exp. Pathol.*, **2**, 407-410.
- Klopproge, J.T., Frost, R.L., & Rintoul, L., 1999. Single crystal Raman microscopic study of the asbestos mineral chrysotile. *Physical Chemistry, Chemical Physics*, **1**, 2559-2564.
- Koskinen HO, Nordman HL, Zitting AJ & al: Fibrosis of the lung and pleura and long-term exposure to wollastonite. *Scand J Work Environ Health* 1997;23:41-47.
- Kunze, G., 1956. Die Gewellte struktur des antigorits, I. *Zeit. Krist.*, **108**, 82-17
- Kunze, G., 1958. Die Gewellte struktur des antigorits, II. *Zeit. Krist.*, **110**, 282-320
- Lahondère D., 2007. L'amiante environnemental en Nouvelle Calédonie : Expertise géologique des zones amiantifères. Evaluation des actions engagées. BRGM/RP-55894-FR, 55 p., 5 fig., 9 pl.
- Lahondère D., Maurizot, P. 2009. Typologie et protocole d'échantillonnage des occurrences naturelles d'amiante en Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-57334-FR, 164 pages.
- Lahondère D., Cagnard F., Lahfid A., Wille G., Maurizot P. 2011. L'amiante dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-59252-FR, 302 pages.
- Lahondère D., Lesimple S., Cagnard F., Lahfid A., Wille G., Maurizot P., 2012. Serpentinisation et fibrogenèse dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-60192-FR, 458 p.
- Leake B.E. *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles : report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, **35**, 219-246.
- Lewis, I., Chaffin, N., Gunter, M., Griffiths, P., 1996. Vibration spectroscopic studies of asbestos and comparison of suitability for remote analysis. *Spectrochimica Acta Part A*, **52**, 315–328.
- Lohmann-Mathes M.L Pulmonary macrophages. 1994 *European Respiratory Journal* .1994; **7**: 1678:1689.
- Luce D, Bugel I, Goldberg P, Goldberg M, Salomon C, Billon-Galland MC, Nicolau J, Quenel P, Fevotte J and Brochard P. Environmental Exposure to tremolite and Respiratory Cancer in Nex Caledonia: A case-control study. *Am J Epidemiol* 2000; **151**:259-65
- Marsh, J.P., Mossman, B.T., 1988. Mechanisms of induction of ornithine decarboxylase activity in tracheal epithelial cells by asbestiform minerals. *Cancer Res.* **48**, 709–714
- Maton D., Maurizot P., 2009. Préconisations de travaux pour la réduction du risque d'exposition dans des zones d'affleurement de roches amiantifères en Nouvelle-Calédonie. BRGM/RP-56666-FR, 141 p., 5 fig., 14 tabl., 9 ann.

- Maurizot, P. & Vendé-Leclerc M., 2012. La géologie. In « Atlas de la Nouvelle-Calédonie » Bonvalot, J., Gay, J. C. & Habert E. coord., Marseille-Nouméa, IRD-Congrès de Nouvelle-Calédonie, planche 13, 4p.
- Maxim LD, McConnell EE : A review of the toxicology and epidemiology of wollastonite. *Inhal Toxicol.* 2005; 17:451-466.
- Meeker G.P., Bern A.M., Brownfield I.K., Lowers H.A., Sutley S.J., Hoepen T.M., Vance J.S. 2003. The composition and morphology of amphiboles from the Rainy Creek Complex, near Libby, Montana. *American Mineralogist*, 1955-1969.
- Mellini M., Ferraris G., Compagnono R. 1985. Carlosturanite : HRTEM evidence of a polysomatic series including serpentine. *American Mineralogist*, 70, 773-781.
- Mellini M., Cressey V., Wicks F. J., and Cressey B. A., 2010. The crystal structure of Mg end-member lizardite-1T forming polyhedral spheres from the Lizard, Cornwall. *Mineral. Mag.*, **74**, 277-284
- Merchant JA : Human epidemiology: a review of fiber type and characteristics in the development of malignant and nonmalignant disease. *Environ Health Perspect.* 1990; 88:287-93.
- Miller BG, Jones AD, Searl A & al: Influence of characteristics of inhaled fibres on development of tumours in the rat lung. *Ann Occup Hyg.* 1999; 43: 167-179.
- Mills, S. J., Hatert, F., Nickel, E. H., Ferraris, G., 2009. The standardisation of mineral group hierarchies : application to recent nomenclature proposals. *European Journal of Mineralogy*, **21**, 1073-1080
- Monchaux G, Bignon J, Jaurand MC & al: Mesotheliomas in rats following inoculation with acid-leached chrysotile asbestos and other mineral fibres. *Carcinogenesis.* 1981;2: 229-36.
- Montoya, J. W. and Baur, G. S., 1963. Nickeliferous serpentines, chlorites and related minerals found in two lateritic ores. *American Mineralogist*, **48**, 1227-1238.
- Mossman BT, Sesko AM: *In vitro* assays to predict the pathogenicity of mineral fibers. *Toxicology* 1990; 60:53-61.
- Mossman BT, Shukla A, Fukagawa NK Highlight commentary on “oxidative stress and lipid mediators induced in alveolar macrophages by ultrafine particles”.? *Free Radic Biol Med.* 2007; 43:504-5.
- Mossman BT: Assessment of the pathogenic potential of asbestiform vs non asbestiform particulates (cleavage fragments) in *in vitro* (cell or organ culture) models and bioassays. *Regul toxicol pharmacol.* 2008;52 suppl 1: S200-203.
- Nagy, B.S., 1953. The textural pattern of the serpentines. *Economic Geology*, 48(7): 591-597.
- Oberdörster G : Toxicokinetics and effects of fibrous and nonfibrous particles. *Inhal Toxicol.* 2002; 14:29-56.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), 2011. Asbestos Fibers and Other Elongate Mineral Particles: State of the Science and Roadmap for Research. Revised Edition.
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 1990. Comments of the National Institute for Occupational Safety and Health on the Occupational Safety and Health Administration's Notice of Proposed Rulemaking on Occupational Exposure to Asbestos, Tremolite, Anthophyllite, and Actinolite.
- OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Occupational Exposure to Asbestos, Tremolite, Anthophyllite and Actinolite. *Federal Register.* 57:110, 29 CFR Parts 1910 and 1926, Docket NO H-033-d.24310 (1992).

- Padron-Navarta, J.A., Hermann, J., Garrido, C.J., Sanchez-Vizcaino, V.L., Gómez-Pugnaire, M.T., 2010. An experimental investigation of antigorite dehydration in natural silica-enriched serpentinite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **159**, 25–42.
- Palacios-Lidon E., Grauby O., Henry C., Astier J. P., Barth C. and Baronnet A., 2010. TEM-assisted dynamic scanning force microscope imaging of (001) antigorite: Surfaces and steps on a modulated silicate. *American Mineralogist*, **95**, 673-685.
- Paoletti L., Batisti D., Bruno C., Di Paola M., Gianfagna A., Mastrantonio M., Nesti M., Comba P. 2001. Unusually high incidence of malignant pleural mesothelioma in a town of eastern sicily: an epidemiological and environmental study. *Arch. Environ. Health*; 55(6), 392–398.
- Palekar LD, Spooner CM, Coffin DL. Influence of crystallization habit of minerals on *in vitro* cytotoxicity. *Ann N Y Acad Sci*. 1979; 330:673-86.
- Pasteris J.D. & Wopenka B., 1987. Use of a laser microprobe to trace geological reactions. *Microbeam Analysis*, 205-209.
- Paustenbach D. (1995) The practice of health risk assessment in the United States (1975-1995): how the U.S and other countries can benefit from that experience. *Hum Ecol Risk Assess*. 2007; 1: 29-79
- Pelletier B., 2006. L'altération supergène de l'antigorite. *Revue Mines (Nouvelle-Calédonie)*, **33**, 18-21
- Pelletier, B., Collot J. et Lafoy Y., 2012. La bathymétrie des marges de la Grande Terre et des îles Loyauté. In « Atlas de la Nouvelle-Calédonie » Bonvallet, J., Gay, J. C. & Habert E. coord., Marseille-Nouméa, IRD-Congrès de Nouvelle-Calédonie, planche 4, 4p.
- Piolatto G, Negri E, La Vecchia C & al: An update of cancer mortality among chrysotile asbestos miners in Balangero, northern Italy. *Br J Ind Med*. 1990; 47:810-4.
- Pugnaloni, A., Giantomassi, F., Lucarini, G., Capella, S., Belmonte, M. M., Orciani, M., and Belluso, E., 2010. Effects of asbestiform antigorite on human alveolar epithelial A549 cells: A morphological and immunohistochemical study. *Acta Histochemica*, **112**, 133-146.
- Pugnaloni A., Giantomassi F, Lucarini G, Capella S, Bloise A, Di Primio R, Belluso E, Cytotoxicity induced by exposure to natural and synthetic tremolite asbestos: an *in vitro* pilot study. *Acta Histochem*. 2013; 115(2): 100-12.
- Putzu M.G., Bruno C., Zona A., Massiccio M., Pasetto R., Piolatto P.G., Comba P. 2006. Fluoro-edenitic fibres in the sputum of subjects from Biancavilla (Sicily): a pilot study. *Environ Health*, 16;5:20.
- Pylef LN, Vasileva LA, Stadnikova NM, Smirnova OV. The role macrophages in asbestos-induced carcinogenesis. *Vopr Onkol*; 2004; 50(6): 678-682.
- Quenel P, Cochet C. 2001. Tremolite (pö) et cancers respiratoires en Nouvelle Calédonie : recommandations concernant les mesures de réduction du risque et le suivi sanitaire de la population. Disponible à partir de l'URL : www.invs.sante.fr
- Record F., 2008. Amiante environnemental en Nouvelle-Calédonie. Cartographie des serpentinites (Poya-Houaïlou) et étude des occurrences de fibres (Hienghène), mémoire d'ingénieur de l'Institut polytechnique Lasalle-Beauvais. (PDF)
- Renier A, Lévy F, Pillière F & al : Unscheduled DNA synthesis in rat pleural mesothelial cells treated with mineral fibres. *Mutat Res*. 1990 ; 241:361-7.
- Reynard, B., Wunder, B., 2006. High-pressure behavior of synthetic antigorite in the MgO–SiO₂–H₂O system from Raman spectroscopy. *American Mineralogist*, **91**, 459–462.
- Ribeiro da Costa I., Barriga F.J.A.S., Viti C., Mellini M., Wicks F.J. 2008. Antigorite in deformed serpentinites from the Mid-Atlantic Ridge. *Eur. J. Mineral.*, 20, 563-572.

- Rinaudo C., Gastaldi D. and Belluso E., 2003. Characterization of chrysotile, antigorite and lizardite by FT-Raman spectroscopy. *Can. Mineral*, **41**, 883-890.
- Ristic, M., Czako-Nagy, I., Music, S., and Vertes, A., 2011. Spectroscopic characterization of chrysotile asbestos from different regions. *Journal of Molecular Structure*, **993**, 120-126.
- Robineau B., 2006. Amiante environnemental en terrain minier - Note de synthèse fin octobre 2006 sur les campagnes de mesures. Rapport DIMENC, Nouméa, Nouvelle-Calédonie
- Robinson BM. Malignant pleural mesothelioma : an epidemiological perspective. *Ann Cardiothorax Surg.* 2012; 1(4) :491-496.
- Rohrbacher R.G. 1973. Asbestos in the Allamoore Talc District, Hudspeth and Culberson counties, Texas. *Univ. Texas Geol. Circ.* 73-1.
- Schinwald A, Chernova T, Donaldson K. Use of silver nanowires to determine thresholds for fibre length-dependent pulmonary inflammation and inhibition of macrophage migration *in vitro*. Part *Fibre Toxicol.* 2012; 9:47.
- Schwartz, S., Guillot, S., Reynard, B., Lafay, R., Debret, B., Nicollet, C., Lanari, P., and Auzende, A. L., 2013. Pressure-temperature estimates of the lizardite/antigorite transition in high pressure serpentinites. *Lithos*, **178**, 197-210.
- Selçuk, Z.T., Coplu, L ;, Emri, S., Kalyoncy, A.F., Sahin, A.A., Baris, Y.I., (1992). Malignant pleural mesothelioma due to environmental mineral fiber exposure in turkey. Analysis of 135 cases. *Chest.*, 102, pp. 790-796.
- Sesko, A., Mossman, B., 1989. Sensitivity of hamster tracheal epithelial cells to asbestiform minerals modulated by serum and by transforming growth factor beta 1. *Cancer Res.* 49, 2743–2749.
- Selikof I, Hammond EC, Churg J. Exposure to asbestos, smoking and neoplasms. *Salud Publica Mex.* 1999; 41 Suppl 2: S 143-154.
- Shcherbakov, S.V., Kashansky, S., Domnin, S.G., Kogan, F.M., Kozlov, V., Kochelayev, V.A. & Nolan, R.P. 2001. The health effects of mining and milling chrysotile: the russian experience. In "The Health Effects of Chrysotile Asbestos: Contribution of Science to Risk-Management Decisions" *Can. Mineral.*, Spec. Publ. 5, pp. 207-211 (2001)
- Shukla A, MacPherson MB, Hillglass J, Ramos-Nino ME, Alexeeva V, Vacek PM, Bond JP, Pass HI, Steel C, Mossman BT *et al.* Alterations in gene expression in human mesothelial cells correlate with mineral pathogenicity. *Am J Respir Mol Biol.* 2009; 41(1):114-23.
- Siegrist HG, and A.G. Wylie (1980). Characterizing and discriminating the shape of asbestos particles. *Environ Res.* 23:348-361.
- Skinner, H.C., Ross, M., and Frondel, C. (1988) Asbestos and other fibrous materials: mineralogy, crystal chemistry, and health effects. Oxford University Press, New York, 222p.
- Srebro SH and V.L. Roggli. (1994). Asbestos-Related Disease Associated With Exposure to Asbestiform Tremolite. *Am J. Ind. Med.* 26(6): 809-819
- Stanton MF, Layard M, Tegeris A & al: Relation of particle dimension to carcinogenicity in amphibole asbestoses and other fibrous minerals. *J Natl Cancer Inst.* 1981; 67:965-975.
- Strunz, H. & Nickel, E.H., 2001. Strunz mineralogical tables : chemical-structural mineral classification system. Schweizerbart Ed., Stuttgart, 870 pp.
- Sullivan P.A. 2007. Vermiculite, respiratory disease, and asbestos exposure in Libby, Montana: update of a cohort mortality study. *Environ Health Perspect.*, 115, 579-585.
- Timblin CR, Guthrie GD, Janssen YW & al: Patterns of c-fos and c-jun proto-oncogene expression, apoptosis and proliferation in rat pleural mesothelial cells exposed to erionite or asbestos fibers. *Toxicol Appl Pharmacol.* 1998; 151:88-97.

Travaglione S, Bruni B, Falzano L & al : effects of the new-identified amphibole fluoro-edenite in lung epithelial cells. *Toxicol In vitro*, 2003; 17:547-52.

Turci F, Tomatis M, Compagnoni R & al: Role of associated mineral fibres in chrysotile asbestos health effects: the case of balangeroite. *Ann Occup Hyg*. 2009; 53: 491-497.

Turci F, Tomatis M, Gazzano E & al: Potential toxicity of nonregulated asbestiform minerals: balangeroite from the western alps. Part 2: oxidant activity of the fibers. *J Toxicol Environ Health A*. 2005; 68: 21-39.

Udovkina N.G., Gorshkov A.I., Shkuropat B.A. 1987. Asbestiform antigorite in the serpentinite from the eclogite-bearing Aktyuz block, northern Tien Shan. *Doklady Akademii Nauk., SSSR*, 293, 963-968.

Uehara, S. & Shirozu, H., 1985. Variations in chemical composition and structural properties of antigorites. *Mineralogical Journal*, 12, 299–318.

Ulrich M. 2010. Péridotites et serpentinites du complexe ophiolitique de la Nouvelle-Calédonie. Etudes pétrologiques, géochimiques et minéralogiques sur l'évolution d'une ophiolite de sa formation à son altération. Thèse Doctorat, Univ. de Nouvelle-Calédonie et Univ. Joseph Fourier (Grenoble). 212 pages.

Valavanidis A, Fiotakis K, Vlachogianni T. Airborn particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms. *J Environ Sci Health C Environ Carcinog Ecotoxicol Rev*. 2008; 26 (4): 339-62.

Vasilewa LA, Pylev LN, Wozniak H & al: Biological activity of synthetic amphibole asbestos. *Pol J Occup Med Environ Health*. 1991; 4: 33-41.

Veblen, D.R. & Wylie, A.G., 1993. Mineralogy of amphiboles and 1:1 layer silicates. In *Health Effects of Mineral Dusts* (G.D. Guthrie Jr. & B.T. Mossman, eds.). *Rev. Mineral*, 28, 61-137.

Virta R.L. 2001. Some facts about asbestos. United States Geological Survey, FS-012-01, 4 pages.

Viti, C. & Mellini, M., 1996. Vein antigorites from Elba Island, Italy. *European Journal of Mineralogy*, 8, 423–432.

Viti, C., 2010. Serpentine minerals discrimination by thermal analysis. *American Mineralogist*, 95(4): 631-638.

Viti, C., Giacobbe, C. and Gualtieri, A.F., 2011. Quantitative determination of chrysotile in massive serpentinites using DTA: Implications for asbestos determinations. *American Mineralogist*, 96(7): 1003-1011.

Wachowski 2000 à compléter (page 46 du rapport)

Wagner JC, Griffiths DM, Munday D, 1987. Experimental studies with palygorskite dusts. *British Journal of Industrial Medicine* 1987;44:749-763.

Wernert P.L., 2007, Cartographie des corps de serpentinite en domaine métamorphique et sédimentaire, reconnaissance des formations et affleurements potentiellement amiantifères. Zone témoin de Houaïlou, Nouvelle-Calédonie, mémoire d'ingénieur. (PDF)

WHO (World Health Organisation): Environmental Health criteria n°53: Asbestos and other natural mineral fibres. Genève, 1986.

Wicks F. J. & Whittaker E.J.W., 1975. A reappraisal of the structures of the serpentine minerals. *Can. Mineral*, 13, 227-243.

Wicks F.J., & O'Hanley D.S., 1988. Serpentine minerals; structures and petrology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 19(1): 91-167.

- Woodworth CD, Mossman BT, Craighead JE. 1983; Induction of squamous metaplasia in organ cultures of hamster trachea by naturally occurring and synthetic fibers. *Cancer Res.*; 43: 4906-12.
- Wozniak H, Wiecek E, Stetkiewicz J, Wyszynska K. Experimental carcinogenicity and mutagenicity of non-asbestos natural fibres. *Pol J Occup Med Environ Health* 1993; 6 (1): 55-60.
- Wunder, B., Baronnet, A., and Schreyer, W., 1997. Ab-initio synthesis and TEM confirmation of antigorite in the system MgO-SiO₂-H₂O. *American Mineralogist*, **82**, 760-764.
- Wunder, B., Wirth, R., and Gottschalk, M., 2001. Antigorite: Pressure and temperature dependence of polysomatism and water content. *European Journal of Mineralogy*, **13**, 485-495.
- Wylie A.G., Verkouteren J.R. 2000. Amphibole asbestos from Libby, Montana: Aspects of nomenclature. *American Mineralogist*, 85, 1540-1542.
- Wylie AG, 1988. The relationship between the growth habit of asbestos and the dimensions of asbestos fibers. Presented at the SME Annual Meeting, Phoenix, AZ, January 25–28.
- Wylie A.G., Huggins C.W. 1980. Characteristics of a potassian winchite-asbestos from the Allamoore talc district, Texas. *Canadian Mineralogist*, 18, 101-107.
- Yazicioglu, S., Oktem, K., İlçayto, R., Balci, K., sayli, B.S., (1978). Association between malignant tumors of the lungs and pleura and asbestosis. A retrospective study. *Chest.*, 73, pp. 52-56.
- Yazicioglu S, İlçayto R, Balci K & al. Pleural calcification, pleural mesotheliomas, and bronchial cancers caused by tremolite dust. *Thorax*. 1980; 35:564-9.
- Yegles M, Janson X, Dong HY & al : Role of fibre characteristics on cytotoxicity and induction of anaphase/telophase aberrations in rat pleural mesothelial cells *in vitro*: correlations with *in vivo* animal findings. *Carcinogenesis*. 1995;16: 2751-8.
- Zussman, J., Brindley, G.W. and Comer, J.J., 1957. Electron diffraction studies of serpentine minerals. *American Mineralogist*, **42**, 133–1

8.2 Normes

- NF X 43-050 (janvier 1996) Qualité de l'air - Détermination de la concentration en fibres d'amiante par microscopie électronique à transmission - Méthode indirecte. AFNOR (Indice de classement : X43-050).
- XP X 43-269 (mars 2002) Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Détermination de la concentration en nombre de fibres par microscopie optique en contraste de phase – Méthode du filtre à membrane. AFNOR (indice de classement : X43-269).
- XP X 43-269 (avril 2012) Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META - Comptage par MOCP. AFNOR (Indice de classement : X43-269)

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2012 -SA- 0 1 9 9

DGT / CT 2
09 JUIL. 2012

Arrivée N°

COURRIER ARRIVE

- 7 AOUT 2012

DIRECTION GENERALE

La Défense, le

Le Directeur Général de la
Prévention des Risques

Le Directeur Général de la Santé

Le Directeur Général du Travail

A

Monsieur le Directeur général de
l'agence française de sécurité
sanitaire de l'environnement et
du travail253 avenue du Général Leclerc
94701 Maisons-Alfort**Direction Générale de la Prévention des Risques**Service de la prévention des nuisances et de la qualité de
l'environnement

Affaire suivie par : Jennifer Cosson

Tél : 01 40 81 86 67

Mél : jennifer.cosson@developpement-durable.gouv.fr

Direction Générale de la SantéSous direction prévention des risques liés à
l'environnement et à l'alimentation

Affaire suivie par : Corinne Drougard

Tél : 01 40 56 50 96

Mél : corinne.drougard@sante.gouv.fr

Direction Générale du Travail

Bureau de la protection de la santé en milieu de travail

Affaire suivie par : Clotilde Belfort

Tél : 01 44 38 26 70

Mél : clotilde.belfort@travail.gouv.fr

Référence :

Objet : saisine de l'Anses relative à l'évaluation de la toxicité des différents faciès de l'antigorite retrouvée en Nouvelle-Calédonie**Eléments de contexte**

La problématique des occurrences naturelles d'amiante dont l'impact sanitaire a déjà été démontré en Nouvelle-Calédonie a conduit les autorités locales de cette collectivité à initier plusieurs études de terrain sur ce sujet et à adopter en 2010 une législation spécifique sur la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics.

Cette délibération n°82 du 25 août 2010 comporte un champ d'application élargi par rapport aux textes existant en métropole en matière d'amiante industriel du fait de la présence avérée dans les sols calédoniens d'autres minéraux que ceux strictement mentionnés à l'article 2 de la directive 2009/148/CE du 30 novembre 2009 et susceptibles de présenter une toxicité comparable. En particulier, suite aux observations déjà réalisées sur l'aptitude de l'antigorite à présenter un faciès fibreux et à des indices parfois contradictoires quant à sa toxicité, ce minéral fréquemment rencontré en Nouvelle-Calédonie a été explicitement visé dans l'article 2 de la délibération susmentionnée :

" Article 2 : Pour l'application de la présente délibération, les termes mentionnés ci-dessous ont les significations suivantes :

1 Les matériaux amiantifères sont des roches contenant des substances naturelles minérales cristallisées, notamment chrysotile (N° CAS 12001-29-5), trémolite (N° CAS 14567-73-8), antigorite (N° CAS: 012135-86-3), en forme de fibres ;

2° Les fibres sont des particules ayant un rapport longueur/diamètre ≥ 3 , des côtés approximativement parallèles et un diamètre inférieur à 3 μm ; [...]"

Cette définition inclut l'extension aux fibres courtes et l'application de critères morphométriques pouvant toucher aussi bien des minéraux de croissance fibreuse *stricto sensu* que des particules respectant ces critères mais issues d'autres faciès du même minéral.

Travaux en cours

La poursuite des travaux géologiques de reconnaissance et de typologie des occurrences amiantifères¹ et les enseignements pouvant être tirés en parallèle de certaines études toxicologiques² tendent à mettre en évidence l'existence de différents faciès d'antigorite sur le sol calédonien ainsi que la suspicion d'effets sanitaires associés sans distinction entre les faciès de l'antigorite. En Nouvelle-Calédonie, d'autres travaux en cours dans le cadre du projet Centre National de Recherche Technologique (CNRT) "Serpentinisation et fibrogenèse dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie"³ apportent également des éléments de mise à jour sur ces questions.

Les particules fibriformes issues des deux faciès d'antigorite sont indiscernables en analyse de routine, ce qui conduit à la difficulté de les comptabiliser séparément en microscopie électronique à transmission analytique (META). Le problème se présente de la même manière pour les amphiboles et en particulier pour la trémolite. Des analyses de données sanitaires compilées à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie à partir des registres de cancers n'ont pas permis d'affirmer ni d'écartier un risque sanitaire lié à la présence d'antigorite⁴. Or les occurrences rencontrées localement semblent majoritairement non asbestiformes (dont les fragments de clivage). Ainsi, le dispositif réglementaire de prévention des risques pour les populations les plus exposées à l'antigorite, à savoir en premier lieu les employés des entreprises du BTP et de l'industrie extractive, repose actuellement sur une incertitude quant au bien-fondé de la prise en compte de l'antigorite quel que soit son faciès.

¹ Lahondère D., Maurizot, P. 2009 - Typologie et protocole d'échantillonnage des occurrences naturelles d'amiante en Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-57334-FR, 164 pages.

² Pugnaroni A, Effects of asbestiform antigorite on human alveolar epithelial A549 cells: a morphological and immunohistochemical study. Acta histochem. 2010 Mar;112(2):133-46.

³ Baumann F. Etat des connaissances et synthèse de la bibliographie sur la toxicité de l'antigorite amiante et Lahondère D. Rapport intermédiaire BRGM/RP-59429-FR

⁴ Baumann F. et al. Pleural mesothelioma in New Caledonia: associations with environmental risk factors. Environ Health Perspect. 2011 May;119(5):695-700.



Questions posées

La réglementation française s'appuie sur la définition du terme « amiante » issue de la directive européenne 2009/148/CE qui désigne par ce terme six silicates fibreux⁵ et dont le potentiel cancérigène est avéré. Cependant, peu de données sont disponibles sur la toxicité des fibres non asbestiformes et des fragments de clivage. Les saisines traitées par l'Anses sur les fibres courtes d'amiante ou sur les fragments de clivage issus de talc trémolitique n'ont pas permis d'affirmer ni d'exclure la toxicité de ces particules. Cette connaissance est essentielle pour asseoir un système de prévention basé sur une classification des minéraux en fonction de leur toxicité réelle pour l'organisme humain.

Dans le cadre de la réglementation de la Nouvelle-Calédonie, des besoins d'instruction apparaissent pour l'antigorite. La DIMENC a ainsi demandé au ministère de l'environnement de saisir l'ANSES pour obtenir une analyse critique de la bibliographie existante sur ce sujet, mettant l'accent sur la distinction préalable ou non des faciès d'antigorite étudiés, et notamment sur les propriétés de danger des fragments de clivage d'antigorite ainsi que des fibres d'antigorite. La littérature scientifique différencie-t-elle le faciès minéral dans les considérations et les résultats relatifs à la toxicité ?

Cette connaissance devra permettre de juger de l'opportunité de préciser le champ d'application de la réglementation en Nouvelle-Calédonie, dans le but d'orienter les moyens de prévention vers les situations qui le nécessitent prioritairement.

Vous associerez les services de la Nouvelle-Calédonie au suivi des travaux et aux restitutions de cette saisine. Ils devront également être sollicités pour recueillir toute information nécessaire à la compréhension du contexte au niveau local. Nous vous remercions de bien vouloir nous communiquer vos éléments de réponse avant le 1^{er} janvier 2013.

Le Directeur général
de la prévention des risques



Laurent Michel

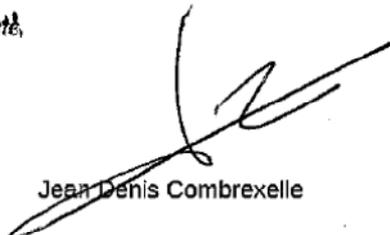
Le Directeur général de la
santé

Le Directeur Général de la Santé,

Dr Jean-Yves GRALL

Jean-Yves Grall

Le Directeur général du
travail



Jean-Denis Combrexelle

Copie : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC), Direction des Affaires Sanitaires et Sociales (DASSNC), Direction générale de l'alimentation (DGAL), Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF).

⁵ L'actinolite amiante, l'amosite, l'anthophyllite amiante, la crocidolite, la trémolite amiante et la chrysotile.

Annexe 2 : Quelques repères minéralogiques des minéraux mentionnés dans ce rapport.

La classification des minéraux, c'est à dire la répartition systématique des espèces minérales en classes et catégories, remonte au début du XIX^e siècle (Berzelius, 1819). Elle repose alors sur leurs compositions chimiques. Les progrès de la chimie analytique et de la cristallographie améliorent la hiérarchisation des minéraux tout au long du XX^{ème} siècle. Les révisions récentes considèrent les groupements d'atomes qui composent le minéral qu'ils soient chargés positivement ou négativement. Les minéraux sont répartis en neuf classes (tableau 5). Deux systèmes de classification existent, elles ont en commun ces neuf classes mais diffèrent par leur numérotation ; il s'agit de la classification de Dana (Gaines *et al*, 1997) qui a été retenue pour ce rapport et de celle de Strunz (Strunz & Nickel, 2001).

Dans ce rapport, seule la classe des silicates a été considérée et parmi eux uniquement certaines sous-classes contenant les minéraux reconnus d'intérêt pour la saisine. Il s'agit de minéraux appartenant aux inosilicates (sous-classes 66, 67 et 68 du tableau 6); aux phyllosilicates (sous-classes 71 et 74 du tableau 6) et aux tectosilicates (sous-classes 77 du tableau 6).

1. Les inosilicates en chaîne simple

Les inosilicates (du grec inos : fil, fibre) rassemblent les silicates dont les tétraèdres SiO_4^{4-} sont disposés en chaînes. Ces chaînes sont le plus souvent simples de périodicité unique ($W=1$) ou doubles ($W=2$) et s'étendent parallèlement à l'axe c de la maille cristalline (figure 3). Plus rarement, les chaînes peuvent être multiples ($W>2$) et ramifiées ou encore en structure tubulaire ou colonnaire.

Ces inosilicates à chaîne simple comprennent le groupe des pyroxènes pour lesquels l'unité de base tétraédrique est Si_2O_6 ou $2(\text{SiO}_3)$, soit deux unités de base $P=2$. Par ailleurs, la valeur de P, variant de 2 à 7 et >7 , sert de base à la classification minéralogique. Certains minéraux de ces groupes ont fait l'objet d'étude dédiée à leur morphologie asbestiforme et leur cancérogénicité.

1.1 La wollastonite

La wollastonite ($\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$, $P=3$) est classée dans le groupe 3 du CIRC regroupant les substances inclassables quant à leur cancérogénicité pour l'Homme.

1.2 La balangeroite

La balangeroite ($(\text{Mg},\text{Fe},\text{Fe},\text{Mn})_{42}\text{Si}_{16}\text{O}_{54}(\text{OH})_{40}$, $P=4$) a été identifiée dans la mine de chrysotile de Balangero, localisée dans un massif de serpentinites satellite du massif de Lanzo (Compagnoni *et al*, 1983 ; Belluso et Ferraris, 1991 ; Bonaccorsi *et al*, 2012). Elle se présente sous la forme de fibres brunes, rigides, pouvant atteindre plusieurs centimètres de longueur dans la direction d'allongement principal du minéral. La balangeroite est étroitement associée à du chrysotile et à de la magnétite.

2. Les inosilicates en chaîne double

Ces inosilicates ont donc comme unité de base Si_4O_{11} ($W=2$ et $P=2$). C'est la sous-classe qui contient les minéraux qui ont une configuration d'amphibole.

Les amphiboles sont très souvent présentes dans les roches magmatiques et métamorphiques. Elles formeraient à elles seules 5% de la croûte continentale. Certaines roches métamorphiques constituées essentiellement d'amphiboles sont appelées amphibolites. D'une manière très générale, les amphiboles cristallisent sous un habitus fibreux non asbestiforme et n'ont pas, en conséquence, les mêmes implications en termes de santé que leurs variétés asbestiformes. Cependant, les amphiboles possèdent deux plans de clivage qui facilitent la production de particules minérales allongées dès lors que des contraintes sont exercées sur les cristaux prismatiques. Le rapport d'allongement de ces particules de type « fragment de clivage » est généralement élevé mais leur diamètre est généralement supérieur à celui des fibres d'amiante (Wylie, 1988).

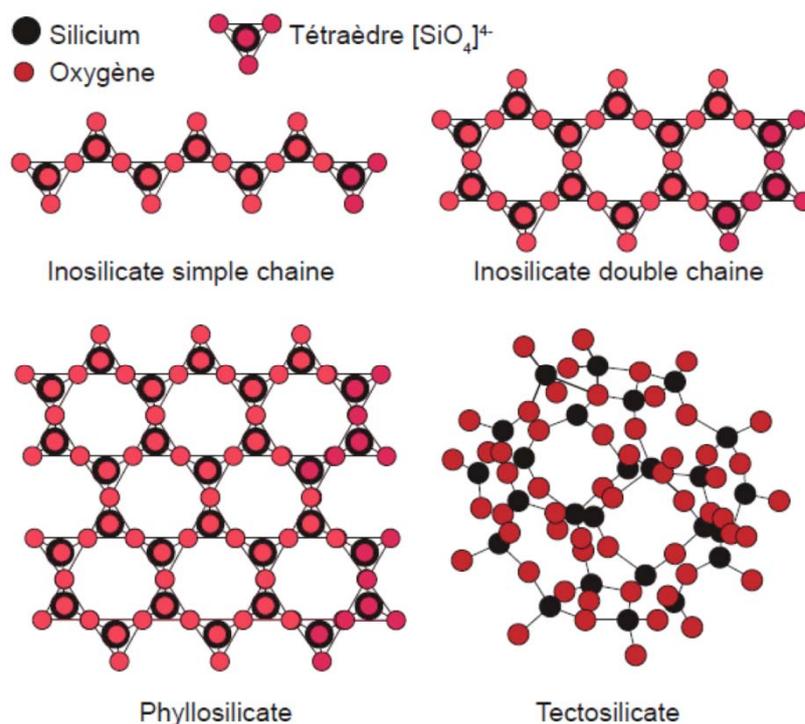


Figure 3 : Représentation schématique des arrangements tétraédriques des inosilicates, phyllosilicates et tectosilicates

2.1 La winchite et la richtérite

La winchite $(\text{Ca},\text{Na})\text{Mg}_4(\text{AlFe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ et la richtérite $\text{Na}(\text{Ca},\text{Na})\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ sont des amphiboles sodi-calciques (Leake *et al.*, 1997). Des occurrences à richtérite potassique (à winchite potassique) asbestiforme ont été décrites par Wylie et Huggins (1980) dans le district à talc d'Allamoore, dans le Texas. Ces occurrences sont interprétées par Rohrbacher (1973) comme liées à la transformation d'une dolomie siliceuse en conditions de basse température. Des occurrences de richtérite²² asbestiforme et de winchite²³ asbestiforme sont également connues et abondamment décrites dans le gisement de vermiculite de Libby, dans le Montana (Wylie et Verkouteren, 2000 ; Virta, 2001 ; Gunter *et al.*, 2003 ; Meeker *et al.*, 2003 ; Bandli *et al.*, 2003 ; Gunter, 2007 ; Sullivan, 2007).

2.2 La fluoro-édénite

La fluoro-édénite $\text{NaCa}_2\text{Mg}_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}\text{F}_2$ appartient au groupe minéralogique de l'édénite, amphibole rattachée par Leake *et al.* (1997) au groupe des amphiboles calciques dont le fluor est dominant en remplacement des hydroxyles. En Sicile, c'est l'exploitation d'une carrière dans la ville de Biancavilla qui semble être à l'origine du nombre élevé de mésothéliomes (Paoletti *et al.*, 2000 ; Putzu *et al.*, 2006). Les fibres proviennent d'une roche volcanique friable associée au cône de l'Etna, exploitée en carrière et utilisée en tant que matériau de construction. La roche renferme des fibres aciculaires d'amphiboles de 0,3 μm de diamètre et 12 à 40 μm de longueur (Burragato *et al.*, 2005 ; Bruni *et al.*, 2006). Les études minéralogiques ont montré que ces amphiboles

²² Au sens de Leake *et al.* (1997)

²³ Au sens de Leake *et al.* (1997)

correspondaient à une nouvelle espèce d'amphibole, la fluoro-édénite (Gianfagna et Oberti, 2001). D'autres travaux ont montré que cette amphibole était associée à des fibres à la fois plus fines (0,1 µm) et plus longues (L/D > 50) correspondant à des fibres de trémolite (Andreozzi *et al*, 2007).

2.3 L'arfvedsonite

L'arfvedsonite est une amphibole rattachée par Leake *et al.* (1997) au groupe des amphiboles sodiques avec une dominance des ions trivalents par le Fe³⁺ en position octaédrique. Le minéral arfvedsonite $\text{NaNa}_2(\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ est sodique uniquement Fe (Fe²⁺ et Fe³⁺). Cette amphibole a été exploitée en Russie, dans les Monts Oural et est suspectée d'être un agent responsable de l'apparition de mésothéliome (Shcherbakov *et al*, 2001). La magnésio-arfvedsonite $\text{NaNa}_2(\text{Mg}_4\text{Fe}^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ est, elle, sodique, magnésienne et ferrière.

3. Les inosilicates à chaînes non ramifiées avec une périodicité > 2

La carlosturanite $(\text{Mg,Fe,Ti,Mn})_{21}(\text{Si,Al})_{12}\text{O}_{28}(\text{OH})_{34}$ est une espèce minérale récemment identifiée, comme la balangeroite, dans des serpentinites à chrysotile des Alpes piémontaises italiennes. Ce minéral est présent dans un système de veines recoupant une serpentinite métamorphique à antigorite du massif ophiolitique du Monviso, en Italie. La carlosturanite possède une morphologie asbestiforme (Compagnoni *et al*, 1985 ; Mellini *et al*, 1985, Belluso et ferraris, 1991).

4. Les phyllosilicates en feuillet à anneaux de six membres

$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ C'est un phyllosilicate avec deux feuillets tétraédriques siliceux et un feuillet octaédrique magnésien Il est aussi appelé pierre à savon ou stéatite. Il montre très peu de substitution des ions au sein de son réseau minéral mais appartient à la série pyrophyllite-talc isostructurale dans laquelle on observe des substitutions octaédriques totales par Al (pyrophyllite) ou le fer ferrique (ferripyrophyllite) ou partielles Ni-Mg (Willemseite) ou Fe²⁺-Mg (Minnesotaite). Ces minéraux sont caractérisés par deux structures dimensionnelles en feuillets séparées par de faibles forces (forces de Van der Waals).

Selon la dernière expertise du Circ sur la cancérrogénicité du talc (IARC, 2010), les experts ont conclu que les preuves épidémiologiques chez l'homme étaient inadéquates et ont classé le talc dans la catégorie 3 (substances non classées). Le NIOSH (2011) arrive aussi à la même conclusion.

5. Les phyllosilicates avec des couches modulées

Dans cette classe, l'intérêt a été porté à la sous-classe des phyllosilicates ayant deux feuillets tétraédriques et un feuillet octaédrique modulés en bandes jointives et notamment le groupe minéralogique palygorskite-sépiolite.

Le minéral palygorskite $(\text{Mg,Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})$ également nommé attapulgitte appartient au sous groupe de la palygorskite. Ce minéral peut être confondu avec la sépiolite son équivalent uniquement magnésien $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ du sous groupe de la sépiolite, il existe une série continue en composition chimique entre ces deux pôles (García-Romero & Suárez, 2010). Des études chez le rat conduisent à considérer que les fibres de palygorskite longues de plus de 5 µm sont susceptibles d'être cancérogènes chez l'Homme (IARC, 1997, 2010). Cependant, la palygorskite reste classée dans le groupe 3 du Circ regroupant les substances inclassables quant à leur cancérrogénicité pour l'Homme. Il en est de même pour la sépiolite, également fibreuse.

6. Les tectosilicates du groupe des zéolites

Les tectosilicates sont des silicates dont les tétraèdres sont associés dans les trois plans de l'espace, chaque tétraèdre étant lié à ses quatre voisins par un atome d'oxygène. 64 % des minéraux sont des tectosilicates. Les zéolites forment une sous-classe à part entière des tectosilicates. Ce sont des minéraux associés à certaines roches volcaniques et volcano-sédimentaires. Leur nomenclature est décrite par Coombs *et al*, 1997.

L'érionite $(\text{Ca, K}_2, \text{Na}_2)_2\text{Al}_4\text{Si}_{14}\text{O}_{36} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ est une zéolite qui appartient au sous-groupe de la chabazite et présente un habitus en cristaux prismatiques à aciculaires. Une fois broyée, l'érionite forme des fibres très comparables d'un point de vue morphologique aux amphiboles asbestiformes

(Circ, 1987 ; Dogan et Dogan, 2008). L'exposition à des fibres d'érionite a été associée à une très forte incidence de cas de mésothéliomes dans les régions turques de Diyarbakir-Cermik (Yazicioglu *et al.*, 1978, 1980), d'Anatolie (Baris *et al.* 1978, 1988) et de Cappadoce (Baris *et al.* 1978 ; Boman *et al.*, 1982 ; Baris, 1991 ; Selçuk *et al.*, 1992). Ces fibres sont issues d'une roche volcanique localement exploitée en carrières pour fournir des matériaux de construction. Dans le rapport NIOSH (2011), un cas possible de mésothéliome associé à l'érionite est également signalé en Amérique du Nord (Kliment *et al.* 2009). En revanche, les études semblent actuellement très insuffisantes pour évaluer le caractère éventuellement cancérigène des zéolites des autres sous-groupes (clinoptilolite, mordenite, phillipsite) (NIOSH, 2011).

Tableau 6 : Classification minéralogique de Dana - 8ème édition (d'après Gaines *et al.*, 1997)

Anciennes classes	Nouvelles classes
Éléments natifs	01. Éléments natifs
Sulfures et sulfosels	02. Sulfures 03. Sulfosels
Oxydes et hydroxydes	04. Oxydes simples 05. Oxydes contenant U et Th 06. Hydroxydes et oxydes contenant OH ⁻ 07. Oxydes multiples 08. Oxydes multiples contenant Nb, Ta, du tantale et/ou Ti
Halogénures	09. Halogénures 10. Oxyhalogénures et hydroxyhalogénures 11. Halogénures complexes – alumino-fluorures 12. Composés d'halogénures
Carbonates, nitrates et borates	13. Carbonates acides 14. Carbonates non hydratés 15. Carbonates hydratés 16a. Carbonates anhydres contenant OH ⁻ ou des halogènes 16b. Carbonates hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 17. Composés de carbonate 18. Nitrates simples 19. Nitrates contenant OH ⁻ ou des halogènes 20. Composés de nitrates 21. Iodate non hydratés et hydratés 22. Iodate contenant OH ⁻ ou des halogènes 23. Composés d'iodate 24. Borates non hydratés 25. Borates non hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 26. Borates hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 27. Composés de borate
Sulfates, chromates et sélénates	28. Sulfates simples et anhydres acides 29. Sulfates simples et hydratés acides 30. Sulfates non hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 31. Sulfates hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 32. Composés de sulfate 33. Sélénates et tellurates 34. Séléniures, tellurures et sulfures 35. Chromates non hydratés 36. Composés de chromate

Phosphates, arséniates et vanadates	37. Phosphates anhydres acides 38. Phosphates non hydratés 39. Phosphates acides hydratés 40. Phosphates hydratés 41. Phosphates non hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 42. Phosphates hydratés contenant OH ⁻ ou des halogènes 43. Composés de phosphate 44. Antimoniates 45. Antimoniures, arséniures et phosphures acides simples 46. Antimoniures, arséniures et phosphures basiques ou contenant 47. Oxysels de vanadium 48. Molybdates et tungstates 49. Molybdates et tungstates basiques et hydratés
Minéraux organiques	50. Sels d'acides organiques et hydrocarbures
Silicates et germanates	
✓ Néosilicates	51. Néosilicate avec [SiO ₄] isolés 52. Néosilicate avec [SiO ₄] isolés et O, OH, F et H ₂ O 53. Néosilicate avec [SiO ₄] isolés et autres anions 54. Borosilicates et quelques béryllosilicates
✓ Sorosilicates	55. Sorosilicate [Si ₂ O ₇], en général sans anion supplémentaire 56. Sorosilicate [Si ₂ O ₇] avec O, OH, F et H ₂ O 57. Sorosilicate [Si ₃ O ₁₀] isolés et non cycliques 58. Sorosilicate isolé, tétraèdres mixtes, isolés et plus gros
✓ Cyclosilicates	59. Cyclosilicate à anneaux de trois membres [Si ₃ O ₉] 60. Cyclosilicate à anneaux de quatre membres [Si ₄ O ₁₂] 61. Cyclosilicate à anneaux de six membres [Si ₆ O ₁₈] 62. Cyclosilicate à anneaux de huit membres [Si ₈ O ₂₄] 63. Cyclosilicates à anneaux condensés 64. Cyclosilicates autres
✓ Inosilicates	65. Inosilicate à chaînes simples non ramifiées, W=1 66. Inosilicate à chaînes doubles non ramifiées, W=2 67. Inosilicate à chaînes non ramifiées, W>2 68. Structure d'inosilicate à chaînes W>1 69. Inosilicate à chaînes branchées ou en boucles 70. Inosilicate à structures tubulaires ou en colonne
✓ Phyllosilicates	71. Phyllosilicate en feuillet à anneaux de six membres 72. Phyllosilicate à feuillet bidimensionnel infini 73. Phyllosilicate à feuillet de tétraèdres condensés 74. Phyllosilicate avec des couches modulées
✓ Tectosilicates	75. Tectosilicate à réseau de tétraèdres Si 76. Tectosilicate à réseau de tétraèdres Si-Al 77. Tectosilicate groupe des zéolites
Silicates non classés	78. Silicates non classés

Annexe 3 : Textes de la délibération n° 82 du 25 août 2010 et de l'arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010 de Nouvelle-Calédonie.

Délibération n° 82 du 25 août 2010
Relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics

Historique :

Créé par

Délibération n° 82 du 25 août 2010 relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics

*JONC du 9 septembre
2010
Page 7869*

Chapitre I Champ d'application et définitions**Article 1^{er}**

Les dispositions des articles 1er à 28 de la présente délibération, prise en application de l'article p. 261-18 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, sont applicables aux travaux de bâtiment, travaux publics ou d'activités extractives, réalisés par les travailleurs susceptibles d'être exposés à l'inhalation de poussières d'amiante lors d'opérations relatives aux sols, dans des zones géologiquement susceptibles de contenir des matériaux amiantifères.

Article 2

Pour l'application de la présente délibération, les termes mentionnés ci-dessous ont les significations suivantes :

- 1° Les matériaux amiantifères sont des roches contenant des substances naturelles minérales cristallisées, notamment chrysotile (N° CAS 12001-29-5), trémolite (N° CAS 14567-73-8), antigorite (N° CAS: 012135-86-3), en forme de fibres ;
- 2° Les fibres sont des particules ayant un rapport longueur/diamètre supérieur ou égal à 3, des cotes approximativement parallèles et un diamètre inférieur à 3 µm ;
- 3° Les poussières d'amiante sont des poussières issues de matériaux amiantifères et contenant des fibres ;
- 4° Un affleurement est une zone de roche en place non recouverte de terre et donc directement observable ;
- 5° Maître d'ouvrage : toute personne physique ou morale pour le compte de laquelle un ou plusieurs ouvrages sont réalisés.

Chapitre II Mesures de prévention**Article 3**

L'employeur prend les mesures nécessaires, notamment en matière d'organisation du travail et de conditions de travail, pour assurer la prévention des maladies professionnelles susceptibles d'être causées par l'exposition aux poussières d'amiante, en maintenant l'exposition des travailleurs aux poussières d'amiante au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre.
Il veille à limiter au maximum le nombre de travailleurs concernés.

Article 4

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

Lorsqu'il réalise des travaux dans des zones susceptibles de contenir des matériaux amiantifères, l'employeur fait réaliser une recherche géologique complétée en tant que de besoin par des analyses d'échantillons de roches.

Celle-ci a pour finalité, eu égard aux travaux à réaliser, de détecter la présence de matériaux amiantifères et la localisation des affleurements.

Article 5

En application de l'article Lp. 267-1 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, dans le cas de travaux de bâtiments et travaux publics dans des zones susceptibles de contenir des matériaux amiantifères, la recherche prévue à l'article 4 incombe au maître d'ouvrage avant le démarrage des travaux.

Celui-ci communique les résultats de cette recherche aux entreprises notamment dans le dossier de consultation des entreprises au moment de l'appel d'offre.

Article 6

Avant le démarrage des travaux de bâtiments ou de travaux publics, l'employeur vérifie auprès du maître d'ouvrage que la recherche géologique prévue à l'article 5 a été effectuée et lui demande le cas échéant, communication des résultats.

Aucun travail exposant des salariés à des poussières d'amiante ne peut être réalisé tant que cette recherche n'a pas été effectuée et les résultats connus.

Article 7

L'employeur procède, en application des articles Lp. 261-2 et Lp. 261-3 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, à une évaluation des risques professionnels compte tenu des travaux envisagés.

Celle-ci comprend notamment une évaluation de la nature, de la durée et du niveau d'exposition des travailleurs à l'inhalation de poussières d'amiante provenant des matériaux manipulés.

Article 8

Sur la base de l'évaluation des risques, et conformément aux objectifs définis à l'article 3, l'employeur élabore et met en œuvre un plan de prévention.

Article 9

Le plan de prévention est transmis au médecin du travail, au service d'inspection du travail, aux services de prévention de la CAFAT, au moins un mois avant le début des travaux.

Conformément aux articles Lp. 262-2 et Lp. 262-13 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, le comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail ou, à défaut, les délégués du personnel sont informés et consultés sur le contenu de ce plan.

Une nouvelle transmission est effectuée lors de tout changement des méthodes de travail mises en œuvre et des équipements de protection utilisés ayant un impact significatif sur le niveau, la durée ou l'étendue de l'exposition ainsi que si une nouvelle identification géologique met en évidence des éléments non pris en compte lors de l'élaboration du plan de prévention.

En cas de travaux urgents dont l'exécution immédiate est nécessaire pour organiser des mesures de sauvetage, pour prévenir des accidents imminents ou réparer des accidents survenus, les dispositions prévues

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

a l'article 4 ne sont pas applicables. Le service d'inspection du travail est informé sans délai de la durée du chantier et des mesures de prévention prises.

Article 10

L'employeur prend toutes mesures appropriées pour que les zones où se déroulent les activités comportant un risque d'exposition soient signalées et ne puissent pas être accessibles à des personnes autres que celles qui, en raison de leur travail ou de leur fonction, sont amenées à y pénétrer.

En cas d'impossibilité, et dans la mesure où ces zones doivent rester accessibles, l'employeur prend les mesures appropriées permettant d'éviter l'exposition, notamment l'arrêt

Article 11

Les travaux dans les zones comportant des matériaux amiantifères sont conçus et organisés de manière à éviter au maximum la production de déblais et à réduire au maximum les opérations de manutention et de transport de matériaux amiantifères.

Les déblais inévitables sont traités de manière à ne pas provoquer d'émission de poussières pendant les opérations de manutention, de transport, d'entreposage ou de stockage et à limiter la contamination de zones saines.

Les matériaux minéraux irrémédiablement souillés par contact avec ces déblais sont traités comme ces derniers.

Article 12

Lorsque la nature des activités ne permet pas une mise en œuvre efficace des moyens de protection collective et conformément à l'article 3, l'employeur met à la disposition des travailleurs les équipements de protection individuelle appropriés et veille à ce qu'ils soient effectivement utilisés.

Il tient compte de la pénibilité de chaque tâche pour déterminer, après avis du médecin du travail, du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail ou, à défaut, des délégués du personnel, la durée maximale du temps de travail avec port ininterrompu d'un équipement de protection individuelle.

L'achat, l'entretien, la vérification et l'élimination de ces équipements sont à la charge de l'employeur.

Article 13

Les résultats des analyses résultant des prélèvements d'air effectués par l'employeur sont communiqués dès leur réception au médecin du travail et au comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail, ou, à défaut, aux délégués du personnel. Ils sont tenus à la disposition de l'inspecteur du travail, du contrôleur du travail, du médecin inspecteur du travail ainsi que des agents du service de prévention de la CAFAT.

Chapitre III Information et formation des salariés

Article 14

L'employeur établit pour chaque poste ou situation de travail exposant les travailleurs à l'inhalation de poussières d'amiante, une notice destinée à les informer des risques auxquels ce travail peut les exposer et des dispositions prises pour les éviter.

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

Cette notice est transmise au médecin du travail et est tenue à la disposition de l'inspecteur du travail et des membres du comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail (CHSCT) ou à défaut des délégués du personnel.

L'employeur informe ensuite le salarié, dans les meilleurs délais, des risques ainsi évalués.

Article 15

Outre l'obligation générale de formation à la sécurité prévue aux articles Lp. 261-24, R. 261-9 à R. 261-12 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, l'employeur, pour affecter un travailleur à des travaux sur terrains amiantifères, lui assure préalablement une formation adaptée à ses activités et ses responsabilités ainsi qu'aux procédés mis en œuvre.

Cette formation doit être facilement compréhensible par le travailleur.

Chapitre IV Suivi médical

Article 16

Un travailleur ne peut être affecté à des travaux dans des zones comportant des matériaux amiantifères que s'il a bénéficié au préalable d'une visite de médecine du travail définissant son aptitude au poste.

Article 17

L'employeur établit et tient à jour une liste des travailleurs employés aux travaux visés par la présente délibération avec indication de la nature de leur activité ainsi que, le cas échéant, des niveaux de l'exposition à l'inhalation de poussières d'amiante auxquels ils ont été soumis et de la durée de cette exposition.

Cette liste et les mises à jour sont transmises au médecin du travail ainsi qu'au comité d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail ou, à défaut, aux délégués du personnel.

Direction et services

Article 18

Tout travailleur a accès aux informations qui le concernent personnellement.

Article 19

Le dossier médical des salariés qui ont été exposés à l'inhalation de poussières d'amiante est conservé pendant 40 ans après la cessation de l'exposition. En cas de fermeture du service de santé au travail du dernier établissement fréquenté par le salarié, son dossier médical est transmis au médecin inspecteur du travail.

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

Article 20

Si le travailleur change d'établissement, les données objectives du dossier médical sont transmises au médecin du travail du nouvel établissement, à la demande du salarié ou avec son accord.

Si l'établissement cesse son activité, le dossier est conservé par le service de santé au travail qui le transmet, à la demande du salarié, au médecin du travail du nouvel établissement ou l'intéressé est employé.

Après le départ à la retraite du salarié, son dossier médical est conservé par le service de santé au travail du dernier établissement fréquenté.

Article 21

Une fiche d'exposition est remplie par l'employeur et le médecin du travail. Elle est remise par l'employeur au salarié à son départ de l'établissement.

Chapitre V Prélèvement et analyse demandés par l'inspecteur du travail

Article 22

L'inspecteur ou le contrôleur du travail peut demander à l'employeur de faire procéder par un organisme accrédité à des prélèvements pour établir le niveau de la concentration moyenne en fibres dans l'air inhalé par des travailleurs.

Article 23

La demande prévue à l'article 22 est motivée et notifiée par écrit à l'employeur, soit par remise en main propre contre décharge, soit par lettre recommandée avec accusé de réception.

L'employeur justifie qu'il a saisi l'organisme accrédité dans les quinze jours suivants la date de la demande de l'inspecteur ou du contrôleur du travail. Il lui transmet les résultats qui lui ont été communiqués par l'organisme dans les dix jours qui suivent cette communication.

Chapitre VI Mesures d'application

Article 24

La présente délibération entrera en vigueur au plus tard le 1er janvier 2012 selon un calendrier d'application défini par arrêté du gouvernement.

Article 25

Un arrêté du gouvernement détermine :

- 1° Les zones géologiquement susceptibles de contenir des matériaux amiantifères, mentionnées à l'article premier ;
- 2° Le calendrier d'application de la présente délibération ;

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

- 3° Les valeurs limites, les modalités de prélèvement, les méthodes et moyens à mettre en œuvre pour mesurer la concentration en fibres d'amiante dans l'air inhalé par les travailleurs ainsi que les modalités d'accréditation des organismes effectuant les prélèvements en application des articles 21 et 22 ;
- 4° Le contenu du plan de prévention prévu à l'article 8 ;
- 5° Le modèle de fiche d'exposition à remplir par l'employeur et le médecin du travail prévue à l'article 20 ;
- 6° Les objectifs et le contenu de la formation à la sécurité prévue à l'article 15 ;
- 7° En tant que de besoin, les règles techniques à respecter pour les entreprises exerçant les activités définies à l'article 1, en tenant compte notamment des équipements, des procédures et des techniques utilisés ;
- 8° Les modalités d'accréditation des organismes habilités à procéder aux prélèvements prévus aux articles 21 et 22.

Chapitre VII Sanctions administratives

Article 26

Le maître d'ouvrage qui ne satisfait pas aux obligations définies par l'article 5, est astreint, à titre de pénalité, au versement au trésor public, d'une somme égale à 500 000 F. CFP.

Article 27

L'employeur, qui ne satisfait pas aux obligations définies par les articles 3 à 13, et 22, est astreint, à titre de pénalité, au versement au trésor public, d'une somme égale à 500 000 F. CFP par travailleur soumis aux risques définis à la présente délibération.

Article 28

Le maître d'ouvrage ou l'employeur à l'égard duquel la pénalité est susceptible d'être prononcée, est informé préalablement, par lettre recommandée avec accusé de réception, des faits qui lui sont reprochés et de la pénalité envisagée. Il est invité à présenter ses observations écrites ou orales dans un délai de 15 jours.

Article 29

Le directeur du travail et de l'emploi ou, pour l'exploitation des mines et carrières, le directeur de l'industrie, des mines et de l'énergie adresse à l'employeur une notification motivée de la pénalité qui lui est appliquée.

Chapitre VIII dispositions diverses

Article 30

À l'article R. 264-6 du code du travail de Nouvelle-Calédonie, le mot "chantier" est remplacé par les mots : "lieu du constat".

Article 31

L'alinéa 8 de l'article 23 de la délibération du 15 octobre 1997 susvisée est remplacé par les dispositions suivantes :

*Délibération n° 82 du 25 août 2010
26/10/2011*

“Dans le cas d'une démolition, le plan de démolition prévoit le retrait préalable de l'amiante et des matériaux en contenant. Le retrait préalable n'est cependant pas obligatoire lorsqu'il causerait un plus grand risque pour les travailleurs que si l'amiante ou les matériaux en contenant étaient laissés en place. L'absence de retrait est dument justifiée dans le plan de démolition.”

Article 32

L'article 13 de la délibération du 15 octobre 1997 susvisée est abrogé.

Arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010
Pris pour l'application de la délibération relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics

Historique :

Créée par

Arrêté n° 2010-4553/GNC du 16 novembre 2010 pris pour l'application de la délibération relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics

JONC du 25 novembre
2010
Page 9426

Chapitre I Champ d'application et définitions

Article 1^{er}

Les zones géologiquement susceptibles de contenir des matériaux amiantifères mentionnées à l'article 1^{er} de la délibération n° 82 du 25 août 2010 susvisée, couvrent l'ensemble du territoire de la Nouvelle-Calédonie à l'exception des îles Loyauté et de la commune de Nouméa.

Article 2

La date d'application de la délibération n° 82 du 25 août 2010 susvisée, est fixée au 1^{er} mai 2011, pour les travaux sur les zones à probabilité forte et moyenne de présence potentielle de fibres d'amiante en roche repérées sur la carte des terrains potentiellement amiantifères établie par la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de la Nouvelle-Calédonie (annexe 1).

Dans le cas où ces travaux sont des travaux de bâtiment et de travaux publics réalisés pour le compte d'un maître d'ouvrage qui a lancé l'appel d'offres avant le 1^{er} mai 2011, l'application des articles 4, 5 et 6 est repoussée au 1^{er} janvier 2012.

La date d'application est fixée au 1^{er} janvier 2012 pour les travaux sur la zone à probabilité indéterminable de la même carte.

Article 3

Le plan de prévention comprend les éléments suivants :

- 1° La zone géographique des travaux incluant un plan détaillé ;
- 2° Les résultats du rapport géologique et analytique d'identification de matériaux amiantifères dans la zone de travaux, ainsi que les conditions prévues de mise à jour de cette identification en fonction de l'avancée des travaux ;
- 3° Les entreprises et les personnels concernés ;
- 4° La période prévue de début des travaux, la période estimative de fin des travaux ;
- 5° La liste et la nature des travaux prévus ainsi que leurs différentes phases ;
- 6° La liste des postes de travail concernés avec les travaux exposant le plus aux poussières ;
- 7° Les méthodes de protection collectives envisagées comprenant notamment un plan d'arrosage ou de brumisation et les équipements prévus pour chaque poste de travail ;

*Arrêté n°2010-4553/GNC du 16 novembre 2010
26/10/2011*

- 8° L'organisation du travail sur le chantier, les horaires de travail, le choix des équipements de protection individuelle lorsque les autres actions de prévention se sont révélées insuffisamment efficaces ;
- 9° La stratégie de prélèvement et le programme de mesures et d'analyse d'air en cours de chantier ;
- 10° Le plan de gestion des déblais de matériaux amiantifères ;
- 11° Les installations sanitaires prévues ;
- 12° Le mode d'élimination des équipements individuels souillés.

Article 4

La concentration moyenne en fibres dans l'air inhalé par un travailleur ne doit pas dépasser 0,1 fibre par centimètre cube sur une heure de travail.

La mesure de la concentration moyenne en fibres dans l'air inhalé par les travailleurs est effectuée conformément aux prescriptions de la norme Afnor XP X 43-269 de mars 2002 : "Qualité de l'air - Air des lieux de travail - Détermination de la concentration du nombre de fibres par microscopie optique en contraste de phase - Méthode du filtre à membrane". Les prélèvements sont faits sur des postes de travail et dans des circonstances où l'empoussièrement est significatif de l'exposition habituelle à l'inhalation des poussières d'amiante.

Article 5

L'accréditation exigée des organismes de prélèvements mentionnés aux articles 22 et 23 de la délibération n° 82 du 25 août 2010 susvisée, est délivrée par un organisme d'accréditation reconnu au niveau national.

Article 6

L'entreprise en charge des travaux ayant généré les remblais contenant de l'amiante tient à jour un registre permettant de garantir leur traçabilité (origine, modalités de transport, date et lieu de stockage.). Ce registre est tenu en permanence à la disposition des services en charge du contrôle de ces travaux.

A la fermeture du site de stockage, il est transmis à la direction de l'industrie, des mines et de l'énergie de la Nouvelle-Calédonie, ainsi qu'à la commune concernée, un plan de localisation délimitant précisément les zones de stockage, accompagné des caractéristiques détaillées des remblais ainsi constitués (dimensions, origine, nature des matériaux et de leur recouvrement).

Article 7

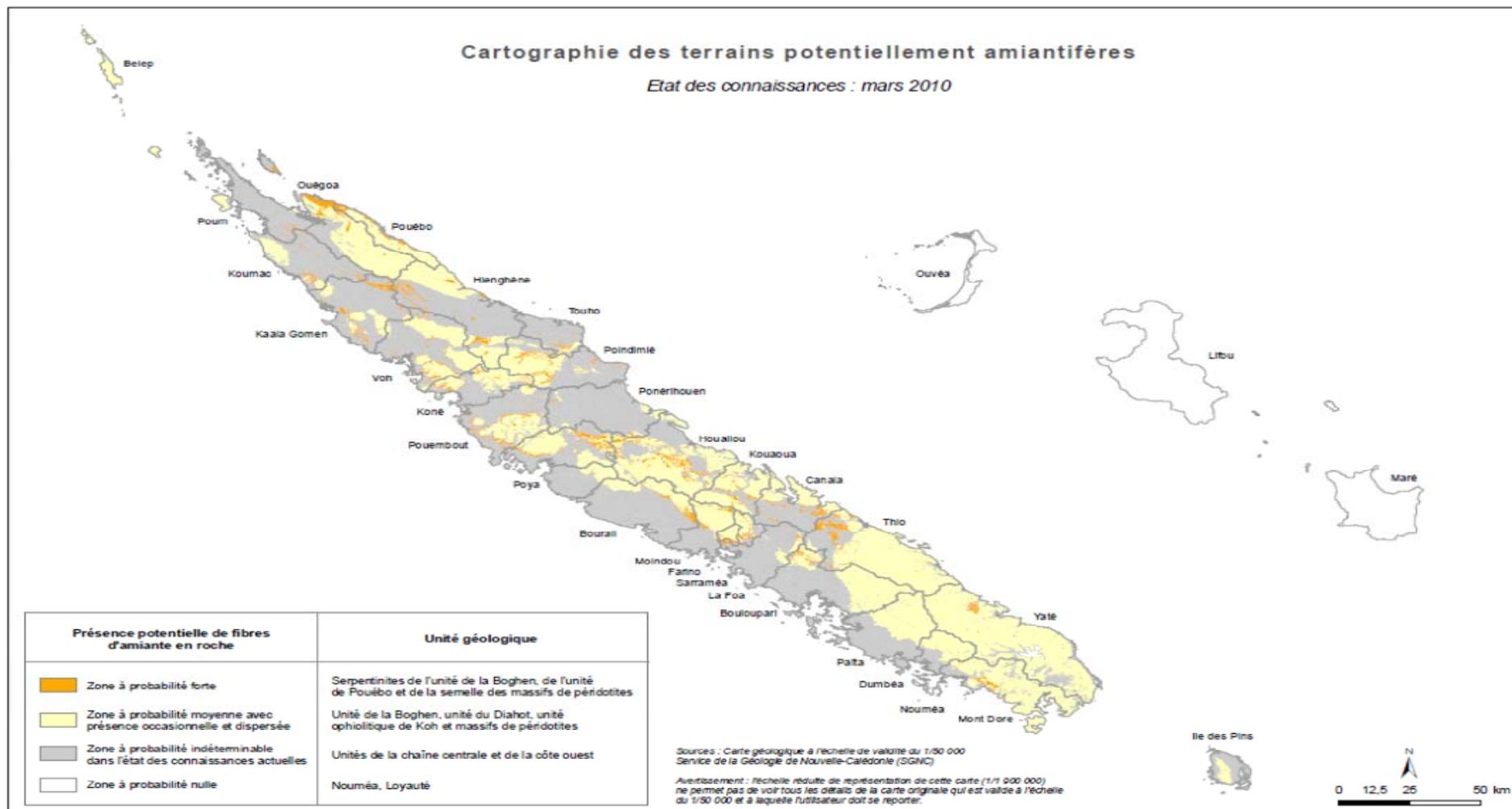
Le modèle de l'attestation d'exposition à remplir par l'employeur et le médecin du travail est défini en annexe 2.

Article 8

Les salariés, opérateurs ou encadrants, bénéficient d'une formation dont le programme est défini en annexe 3. Cette formation initiale est complétée périodiquement par une formation de rappel.

Article 9

Une attestation de formation mentionnant le nom du formateur est remise à chaque salarié. Une copie des attestations de formation est tenue à la disposition des agents de contrôle au siège de l'entreprise.



ANEXE II**Modèle de l'attestation d'exposition à remplir
par l'employeur et le médecin du travail**

L'attestation d'exposition prévue à l'article 21 de la délibération n° 82 du 25 août 2010 relative à la protection des travailleurs contre les poussières issues de terrains amiantifères dans les activités extractives, de bâtiment et de travaux publics qui doit être remise par l'employeur au salarié à son départ de l'établissement où il a été exposé à l'inhalation des poussières d'amiante, comporte :

1° Des éléments d'identification concernant :

- 1.1. le salarié (nom, prénoms, numéro d'immatriculation C.A.F.A.T et adresse),
- 1.2. l'entreprise ou l'établissement dans le(s)quel(s) le salarié a été exposé aux poussières d'amiante (nom, raison sociale, R.I.D.E.T. et adresse),
- 1.3. le médecin du travail (identification du médecin du travail, du service médical d'entreprise ou du service interentreprises).

2° Des éléments d'information fournis par l'employeur et le médecin du travail :

- 2.1. nature des fibres d'amiante,
- 2.2. description succincte du (ou des) poste(s) de travail,
- 2.3. date de début et de fin d'exposition,
- 2.4. dates et résultats des évaluations et mesures des niveaux d'exposition sur les lieux de travail,
- 2.5. nature des équipements de protection individuelle qui ont été mis à disposition du salarié,
- 2.6. description des équipements de protection collective.

3° Des éléments d'information fournis par le médecin du travail et adressés, après accord du salarié, au médecin de son choix :

- 3.1. les dates et les constatations cliniques qui ont été effectuées durant l'exercice professionnel du salarié en précisant, notamment, l'existence ou l'absence d'anomalies en relation avec l'inhalation de poussières d'amiante,
- 3.2. les dates et résultats des examens complémentaires effectués dans le cadre de la surveillance médicale spéciale, propre aux risques liés à l'amiante et prévue à l'annexe I fixant les instructions techniques que doivent respecter les salariés concernés,
- 3.3. la date et les constatations du dernier examen médical effectué avant la cessation d'exposition aux poussières d'amiante,
- 3.4. tout autre renseignement que le médecin du travail juge utile de fournir.

*Arrêté n°2010-4553/GNC du 16 novembre 2010
26/10/2011*

ANEXE III

Objectifs et contenu de la formation

1. Formation des opérateurs :

La formation initiale, facilement compréhensible doit permettre aux opérateurs de se protéger efficacement.

Elle porte notamment sur les points suivants :

- Connaître les caractéristiques et propriétés de l'amiante et ses effets sur la santé, notamment les effets cancérogènes.
- Connaître l'effet synergique du tabagisme.
- Acquérir des éléments de reconnaissance des principaux matériaux amiantifères qu'on trouve dans l'environnement de la Nouvelle-Calédonie.
- Connaître les dispositions réglementaires relatives à la surveillance médicale et à l'information personnelle des travailleurs.
- Connaître et être capable d'appliquer les méthodes de travail et les procédures opératoires recommandées et adaptées à la protection des travailleurs et de l'environnement. Sont notamment visées : les méthodes de réduction d'émission de fibres d'amiante (en particulier, arrosage, brumisation, ...) le balisage des zones à risque, la gestion des déblais, les procédures de décontamination du personnel et des équipements.
- Connaître le rôle des équipements de protection collective. Etre capable de les utiliser selon les consignes établies. Etre capable de détecter des dysfonctionnements et d'alerter le personnel d'encadrement.
- Etre capable d'utiliser les équipements de protection individuelle selon les consignes établies, ainsi que connaître leur rôle, leurs limites d'efficacité et les durées de port en continu recommandées. Une manipulation pratique des équipements de protection individuelle sera organisée.
- Etre capable de détecter des dysfonctionnements et d'alerter le personnel d'encadrement.
- Etre capable de comprendre la signalétique sur les zones de risque.

La formation de rappel poursuit les mêmes objectifs que la formation initiale.

2. Formation de l'encadrement technique :

Cette formation vise notamment la bonne mise en œuvre de ce qui a été pensé et élaboré par le corps technique dans le plan de prévention.

Pour l'encadrement technique, le contenu de la formation destinée aux opérateurs est complétée notamment par :

- les aspects réglementaires de la prévention ;
- la gestion des déblais ;
- les méthodes de prélèvement et d'analyse ;
- le mode d'élimination des équipements individuels souillés.

Elle doit également les rendre capables de transmettre aux opérateurs l'information sur la prévention des risques liés à l'amiante.

Dans un but d'alerte en cas de suspicion de présence de matériaux naturels amiantifères et pour permettre la mise en œuvre rapide de mesures d'identification ou le renforcement des dispositifs de protections collectives et/ou individuelles si nécessaire, une formation théorique et pratique est organisée sur :

- l'identification des minéraux fibreux (notamment serpentines, chrysotile, antigorite, trémolite),
- la reconnaissance de la végétation associée aux péridotites et serpentinites,
- la reconnaissance des formations géologiques potentiellement amiantifères,
- l'aspect des minéraux asbestiformes dans l'environnement,
- l'examen à l'aide d'une loupe binoculaire de matériau fibreux.



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr