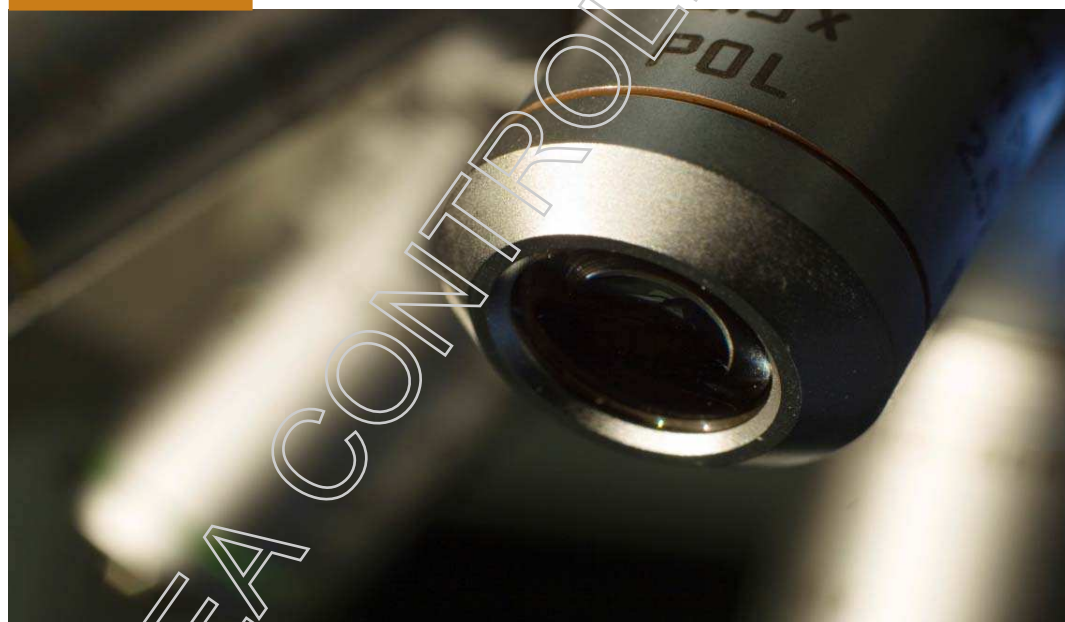


Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-880



État des connaissances sur la relation entre les concentrations d'amiante dans le sol et dans l'air

*Martine Lévesque
Chantal Dion
France Labrèche
Joseph Zayed*





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2015
ISBN : 978-2-89631-814-8 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Mai 2015



Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-880

État des connaissances sur la relation entre les concentrations d'amiante dans le sol et dans l'air

Avis de non-responsabilité

L'IRSSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Martine Lévesque
Consultante

Chantal Dion, France Labrèche
IRSSST

Joseph Zayed
Université de Montréal

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSSST.

Cette étude a été financée par l'IRSSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

ALEA CONTRÔLES

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

Les activités reliées à des travaux d'aménagement, de sécurisation ou de réhabilitation de sites contaminés par de l'amiante peuvent entraîner la mise en suspension de fibres dans l'air. Les concentrations de fibres dans l'air peuvent dépendre de plusieurs paramètres dont la connaissance peut influencer sur le choix de mesures de prévention et de protection des travailleurs.

La présente étude visait donc à dresser l'état des connaissances sur la relation entre les concentrations de fibres d'amiante dans le sol et celles dans l'air. Pour ce faire, une revue de la littérature a été réalisée à partir de différents mots-clés incluant : « asbestos » associé à « soil » et « air ». Les études en situation réelle ou simulée ainsi que les études expérimentales ont été considérées. Au total, 241 publications ont été recensées, mais seulement cinq ont été retenues dont deux de type terrain et trois de type expérimental.

En résumé, le taux d'humidité du sol, sa concentration en amiante et le genre d'activités sur le site (qui est directement lié au brassage du sol), apparaissent comme étant les caractéristiques les plus influentes de la libération des fibres dans l'air. Des facteurs de moindre importance, tels que la nature du sol, le type d'amiante et la distance de la source d'émission peuvent également avoir une incidence. Enfin, les conditions météorologiques (pluie, vent et ensoleillement), la présence de couvert végétal et la friabilité des matériaux pourraient avoir un effet de moindre impact sur l'émission de fibres d'amiante aéroportées.

De façon plus détaillée, les études de terrain ont montré que le niveau de dérangement du sol est un paramètre important pouvant influencer la mise en suspension dans l'air de fibres d'amiante à partir d'un sol contaminé. Ainsi, lors de travaux de réparation d'une route recouverte de gravier contaminé par de l'amiante (moins de 0,5 % de trémolite-actinolite), les opérateurs de niveleuse et les inspecteurs étaient les plus exposés, avec une moyenne respective de 0,276 f/cm³ et 0,260 f/cm³ tandis que l'exposition des signaleurs et des opérateurs de rouleau compacteur était faible, soit inférieure à 0,1 f/cm³. De plus, lors de la réalisation de travaux de différentes natures (râtelage, pelletage et excavation d'une tranchée à l'aide d'une pelle rétrocaveuse) sur des sols dont la distribution de l'amiante était non homogène (de non détecté à 3 % d'amiante), les concentrations de fibres provenant d'échantillons prélevés en postes personnels variaient de non détecté à 0,25 f/cm³. Ces mêmes échantillons de sols, agités en chambre expérimentale dans des conditions de pire scénario, ont donné des concentrations de fibres aéroportées pouvant dépasser 10 f/cm³.

La distance de la source d'émission est un facteur pouvant également influencer la concentration de fibres d'amiante dans l'air. Ainsi, pour un sol contenant 10 % d'amiante, les concentrations près de la source se situaient entre 0,01 et 0,1 f/cm³ et diminuaient avec la distance pour s'abaisser à moins de 0,001 f/cm³ à plus de 100 mètres de la source, soit un facteur d'abaissement variant de 10 à 100.

Les études expérimentales, réalisées en chambre à partir d'échantillons pour lesquels les différents paramètres (concentration d'amiante, nature du sol – sable, argile, intermédiaire – et type d'amiante – amosite, chrysotile, crocidolite) étaient contrôlés, ont montré des relations entre les propriétés du sol et la génération de fibres dans l'air.

Ainsi, les sols dont la teneur en amiante était plus élevée (1 %) ont généré une concentration plus importante de fibres dans l'air, soit 100 fois plus que pour des sols contenant 0,001 % (10,8 et 0,11 f/cm³ respectivement). Les sols sablonneux ont généré les plus hautes concentrations de fibres d'amiante aéroportées alors que l'argile a libéré les plus basses concentrations, avec respectivement 0,07 - 15,9 f/cm³ et 0,13 - 6,6 f/cm³. Les sols contenant du chrysotile ont libéré les plus basses concentrations de fibres (de 0,06 à 6,1 f/cm³), suivis des sols contenant de l'amosite (0,1 à 12,6 f/cm³) et finalement de ceux renfermant de la crocidolite (0,17 à 13,8 f/cm³). Les concentrations de fibres d'amiante aéroportées dépendaient plus de la teneur de ce minéral dans le sol que du type d'amiante ou de la nature du sol. Il faut faire preuve d'une grande prudence dans l'interprétation de ces résultats, provenant d'études expérimentales réalisées souvent dans des conditions de pires scénarios, et veiller à ne pas généraliser ou à extrapoler en appliquant les conclusions à des situations réelles.

De tous les paramètres influant sur la diminution de la concentration de fibres aéroportées, c'est l'arrosage du sol qui a le plus grand impact. De façon générale, on peut considérer que pour tous les types de sol et d'amiante évalués, l'introduction de seulement 5 à 10 % d'humidité provoque le plus grand effet sur la réduction de fibres dans l'air et que la concentration de fibres peut passer de 5 à 0,01 f/cm³ en humidifiant le sol à 50 %, soit une réduction pouvant aller jusqu'à 500 fois. Par ailleurs, dans l'environnement extérieur, un sol couvert de végétation contiendrait déjà plus de 10 % d'humidité alors qu'un sol sans couvert végétal aurait tendance à sécher plus rapidement, en particulier dans des conditions de chaleur et d'ensoleillement, et serait plus susceptible de libérer des fibres dans l'air.

Toutefois, les informations scientifiques sont encore trop limitées pour déterminer avec une certaine assurance et avec précision la contribution du sol contaminé à l'amiante aux concentrations de fibres dans l'air et, ultimement, à l'exposition des travailleurs. En effet, le peu d'études, leurs limites méthodologiques, la non-comparabilité des études de terrain et des études expérimentales, et la variabilité des résultats rendent difficile toute initiative permettant de conclure de façon ferme. Considérant que seul le taux d'humidité du sol est un paramètre sur lequel une action immédiate peut être portée pour minimiser la libération des fibres d'amiante dans l'air, il est fortement suggéré d'arroser les sols avant toute intervention et d'appliquer les principes généraux d'hygiène du travail pour assurer la protection des travailleurs.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	i
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	vii
Liste des abréviations, sigles et acronymes.....	ix
1. Introduction	1
2. Objectif	3
3. Méthodologie	5
3.1 Critères de sélection et d’exclusion des documents	6
3.2 Développement d’une fiche d’extraction des données.....	7
4. Résultats	9
4.1 Études de terrain	9
4.1.1 Évaluation de l’exposition des travailleurs lors de la construction d’une route avec du gravier contenant de l’amiante.....	9
4.1.2 Étude de la contamination sur le site d’une usine d’exfoliation de vermiculite	11
4.2 Études expérimentales.....	13
4.2.1 Pire scénario : Étude expérimentale réalisée avec des mélanges artificiels.....	13
4.2.2 Études expérimentales réalisées à partir d’échantillons de sols existants et de mélanges artificiels	15
5. Discussion	19
5.1 Paramètres pouvant influencer la libération de fibres dans l’air	19
5.1.1 Paramètres ayant un impact important sur la libération de fibres d’amiante dans l’air	20
5.1.2 Paramètres ayant un impact variable sur la libération de fibres d’amiante dans l’air	21
5.1.3 Paramètres dont l’impact sur la libération de fibres d’amiante dans l’air n’a pas été mesuré dans les études retenues	22
5.2 Moyens de maîtrise et équipements de protection individuelle.....	23
5.3 Limites de la recherche	23
5.3.1 Nombre d’études et variabilité des résultats	23
5.3.2 Méthodes d’échantillonnage et d’analyse	24

6. Conclusion	27
BIBLIOGRAPHIE	29
Annexe 1 : Fiche d’extraction décrivant les études de terrain	33
Annexe 2 - Fiche d’extraction décrivant les études expérimentales	35

ALEA CONTROLES

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Liste des termes équivalents utilisés dans les équations de recherche bibliographique	6
Tableau 2 – Paramètres ayant un impact sur la libération de fibres d’amiante dans l’air.....	20

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Logigramme présentant la sélection des publications pertinentes au regard de l’objectif fixé.	7
Figure 2 - Principaux paramètres impliqués dans la libération des fibres d’amiante	19

ALEA CONTRÔLES

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASTM :	American Society for Testing and Materials
CD :	Courte durée
CCHST :	Centre canadien d’hygiène et de sécurité au travail
CSST :	Commission de la santé et de la sécurité du travail
ECM :	Esters de cellulose mélangés
EPA :	Environmental Protection Agency (États-Unis)
EQM :	Exposition quotidienne moyenne
HSE :	Health and Safety Executive (Royaume-Uni)
INRS :	Institut national de recherche et de sécurité (France)
INSPQ :	Institut national de santé publique du Québec
MCA :	Matériaux contenant de l’amiante
MEB :	Microscopie électronique à balayage
MEB-EC :	Microscopie électronique à balayage avec émission de champ
MeSH :	Medical subject headings
MET :	Microscopie électronique à transmission
MOCP :	Microscopie optique à contraste de phase
MOLP :	Microscopie optique à lumière polarisée
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health (États-Unis)
OEME :	Office of Environmental Measurement and Evaluation (États-Unis)
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration (États-Unis)
PEL :	Permissible exposure limit (limite d’exposition admissible)
VR :	Véhicule récréatif

1. INTRODUCTION

L'amiante est une variété de silicates hydratés formés naturellement au cours du métamorphisme des roches. On distingue deux variétés d'amiante : la serpentine, dont la seule espèce fibreuse est le chrysotile, et les amphiboles représentées par cinq espèces : anthophyllite, amosite, crocidolite, actinolite et trémolite (CSST, 2014). Les amphiboles peuvent se présenter sous forme asbestiforme (fibreuse) ou non asbestiforme (fragments de clivage). Les propriétés physiques et chimiques exceptionnelles de l'amiante, dont sa résistance aux hautes températures et aux acides, ses qualités d'isolant thermique ou phonique ainsi que ses bonnes performances mécaniques ont favorisé son utilisation dans les bâtiments et dans de multiples procédés industriels au cours des dernières décennies.

Outre le creusement de tunnels et l'exploitation de carrière de granulats, deux principales sources d'amiante provenant des sols ont été identifiées :

- Affleurements naturels d'amiante comme on en retrouve dans certains pays :
 - Mines abandonnées (INSPQ, 2003)
 - Chrysotile en Corse et en Nouvelle-Calédonie (INRS, 2013)
 - Érionite et trémolite en Turquie (Expertise collective INSERM, 1997)
 - Trémolite/actinolite dans la vermiculite de Libby au Montana (Amandus et coll., 1987)
 - Fluoro-édenite en Sicile (Gianfagna et Oberti, 2001)
- Sites et sols contaminés par de l'amiante :
 - Anciennes usines d'exploitation ou de transformation de l'amiante
 - Zones remblayées avec des matériaux contaminés par de l'amiante
 - Sites d'enfouissement.

La quantité d'amiante dans les roches peut varier de moins de 1 % à parfois plus de 25 %. Lorsque les roches ne sont ni altérées, ni manipulées, ni utilisées, les fibres d'amiante demeurent liées à la roche et ne peuvent donc pas se retrouver dans l'air. Les fibres d'amiante peuvent toutefois être mises en suspension dans l'air lorsque les roches sont soumises à l'érosion, au vent et aux glissements de terrain. La capacité d'une roche amiantifère à libérer ses fibres dépend de plusieurs paramètres dont sa teneur en fibres, la proportion de fibres en surface et la friabilité de la roche (INRS, 2013).

La majorité des produits contenant de l'amiante ne sont ni utilisés ni produits de nos jours, mais sont encore retrouvés dans des bâtiments, des matériaux, des installations ou dans des lieux où ils sont entreposés. L'exposition aux fibres d'amiante peut donc se produire lors de différentes activités industrielles telles que des opérations de maintenance ou d'entretien des bâtiments renfermant de l'amiante (WHO, 1998), lors du démantèlement de structures ou de matériaux contenant de l'amiante (MCA) (Dufresne et coll., 2009a), lors du transport et de la disposition des MCA (INSPQ, 2009). Les interventions sur ces produits ou dans des environnements où ils sont présents peuvent engendrer des risques pour la santé puisqu'ainsi les fibres d'amiante pourraient être mises en suspension dans l'air et, subséquemment, être inhalées.

2. OBJECTIF

L'objectif de cette étude était de dresser l'état des connaissances sur la relation entre les concentrations d'amiante dans le sol et les concentrations de fibres dans l'air dans un contexte de travail sur un site contaminé. De façon spécifique, cette étude visait à identifier l'ensemble des paramètres déterminant cette relation et l'importance de leur rôle.

ALEA CONTROLES

3. MÉTHODOLOGIE

L’essentiel de cette étude consistait à revoir la littérature, à la résumer et à en présenter les grandes conclusions dans un rapport succinct.

La revue de la littérature a été de type examen de la portée (*scoping review*). Cette méthode est de plus en plus répandue pour faire la synthèse des concepts d’un domaine de recherche large et peu exploré (Arksey et O’Malley, 2005; Mays et coll., 2001). Sans être soumis au cadre rigide d’une revue systématique des écrits, l’examen de la portée vise notamment à explorer l’étendue, la nature et la portée des travaux de recherche en cours et à synthétiser ou émettre des hypothèses conformes à la littérature existante (Arksey et O’Malley, 2005).

La recension des écrits a été faite parmi les articles de revue révisés par un comité de lecture, de même que parmi les rapports scientifiques publiés par certaines organisations dotées de programmes de qualité avec révision par des pairs tels le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) américain, le Health and Safety Executive (HSE) britannique, l’Institut national de recherche et de sécurité (INRS) français et l’Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST).

La recherche bibliographique a été effectuée en interrogeant simultanément les bases de données documentaires spécialisées en santé au travail et couramment utilisées à l’IRSST : BIOSIS; les bases de données offertes par le Centre canadien d’hygiène et de sécurité au travail (CCHST), soit Canso, OSHLINE®/NIOSHIC® (du NIOSH), HSELINE (du HSE), CISILO/CISDOC (du Bureau International du Travail) et INRS bibliographie; CAB Abstracts; Embase; le catalogue de la CSST, ISST; OSHUPDATE + FIRE; la base de données de l’Institut de l’information scientifique et technique, PASCAL; PubMed; Toxline; Web of Science; Current Contents, ProQuest (dissertations et thèses), Google Scholar et Chemical Abstracts.

Plusieurs mots-clés ont été utilisés dans quelques stratégies de recherche associant la notion d’amiante à celles du sol et de l’air. Différentes combinaisons des mots-clés suivants (ou de leurs équivalents) ont été utilisées en tenant compte des particularités propres à chaque source bibliographique (voir le tableau 1) : amiante (amiante, asbestos, asbestos/analysis [MeSH]^a, asbestos [MeSH]), air (air, air pollutants, occupational [MeSH], air pollutants [MeSH], air pollution [MeSH], concentration, environmental exposure [MeSH], exposition, exposure, inhalation, exposure [MeSH], occupational exposure [MeSH]), matériaux (bulk, construction, materials [MeSH], material, materials, soil, soil pollutants [MeSH], soil [MeSH], soils).

L’interrogation des bases de données s’est effectuée en date du 15 août 2014, sans préciser de limites quant aux années de publication. La recherche bibliographique a finalement été complétée à l’aide de références tirées des articles et rapports consultés.

^a [MeSH] : «Medical subject headings»; liste normalisée de termes utilisés pour l’analyse documentaire dans le domaine biomédical. Le MeSH s’appuie sur le système MEDLINE-PubMed.

Tableau 1 – Liste des termes équivalents utilisés dans les équations de recherche bibliographique.

Terme initial principal	Termes équivalents recherchés				
Asbestos	Serpentine	Amphibole	Chrysotile	Amosite	Anthophyllite
	Tremolite	Cummingtonite	Actinolite	Winchite	Asbestos, Amosite [MeSH]
	Asbestos, Amphibole [MeSH]	Serpentine [MeSH]	Asbestos [MeSH]	Amiante	
Soil	Land	Soils	Soil pollutant	Soil pollutants [MeSH]	Soil [MeSH]
	Sol	Sols	Dust		
Air	Air [MeSH]	Air pollutants [MeSH]			
Measurement	Concentration	Analysis	Analyse	Analysis [Subheading]	Analytic
	Analytical	Chemistry techniques, analytical [MeSH]	Concentration		

3.1 Critères de sélection et d'exclusion des documents

L'atteinte de l'objectif fixé exigeait de disposer de données de mesures quantitatives d'amiante dans le sol et dans l'air, idéalement de façon simultanée. Les documents retenus devaient présenter des résultats de mesure des paramètres qui influencent la relation entre la concentration de fibres d'amiante dans le sol et celle mesurée dans l'air. Ont été considérés les documents présentant des résultats mesurés en milieu de travail ou à la suite d'une simulation de travaux réels à l'extérieur (études de terrain) de même que les études expérimentales en laboratoire simulant des conditions associées aux paramètres influençant la concentration de fibres dans l'air. La démarche générale effectuée pour la sélection des documents est présentée à la figure 1. Au total, des 241 articles ou rapports qui ont été recensés, seulement cinq ont été retenus pour description détaillée, dont deux portant sur des études de type terrain et trois portant sur des études de type expérimental. Ont été exclus les doublons (10), les documents généraux sur l'amiante ne contenant pas de données quantitatives (12), les articles rédigés dans une autre langue que l'anglais ou le français (11), les études épidémiologiques sans évaluation directe de l'exposition (26), les études de surveillance médicale (3), les articles hors contexte (94), les articles non pertinents (64) et les articles visant à évaluer des méthodes d'échantillonnage et d'analyse (7). Se sont ajoutées 22 références provenant de publications consultées. Parmi les 36 publications restantes, 31 répondaient partiellement aux critères d'inclusion (c'est-à-dire qu'il n'était pas possible d'en déduire une association entre la quantité de fibres dans l'air et celle présente dans le sol) : ces articles ont cependant été utilisés dans la discussion.

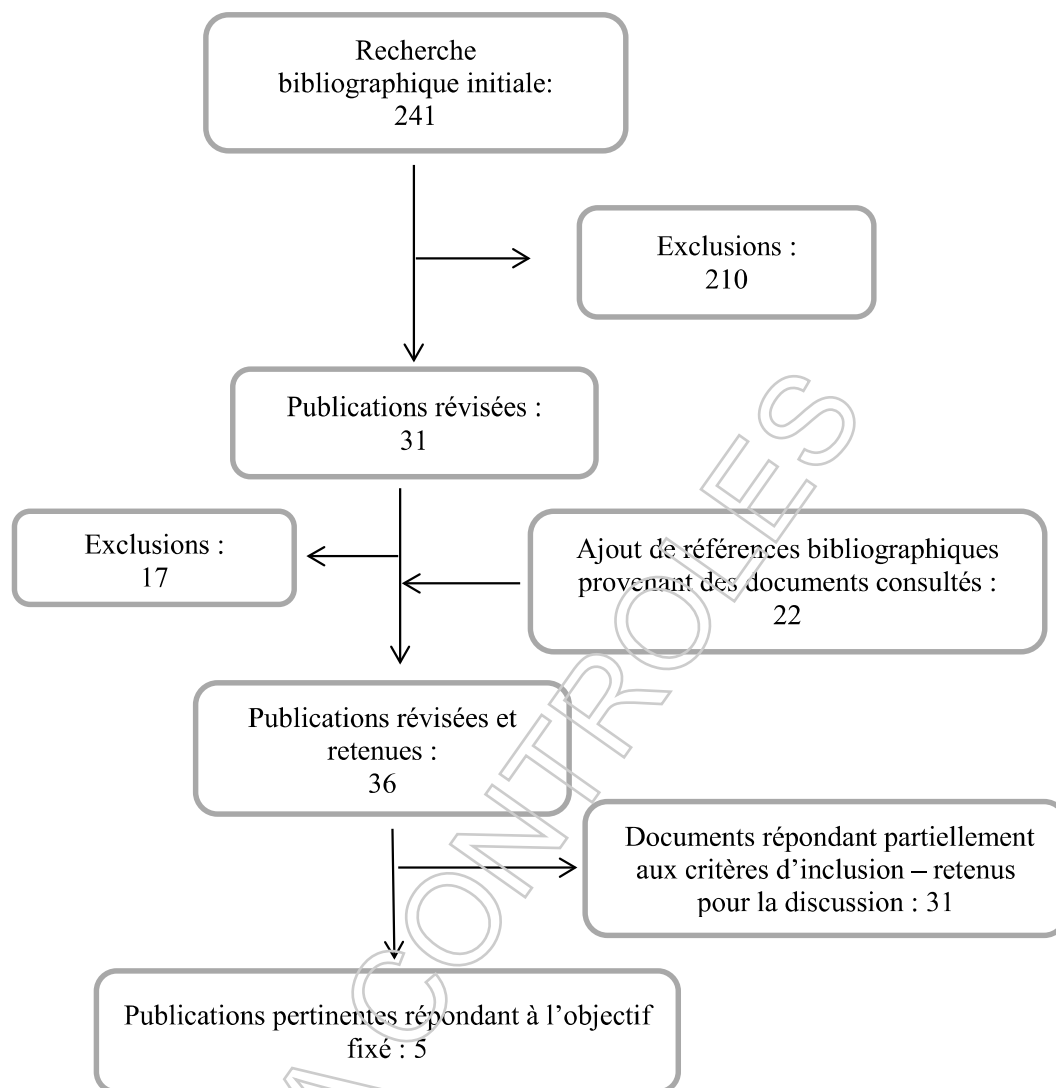


Figure 1 - Logigramme présentant la sélection des publications pertinentes au regard de l’objectif fixé.

3.2 Développement d’une fiche d’extraction des données

L’information pertinente concernant les propriétés du sol, les facteurs météorologiques et les facteurs anthropiques permettant de répondre à l’objectif de cette recherche documentaire a ensuite été extraite des publications sélectionnées. Cette information a été compilée dans un fichier Excel. De plus, lorsque disponibles, les informations relatives aux moyens de protection des travailleurs en fonction des concentrations de fibres d’amiante dans l’air ont été recueillies.

4. RÉSULTATS

La revue de la littérature témoigne du très peu d’études ayant examiné le lien entre les concentrations d’amiante dans le sol et dans l’air. Malgré une approche très inclusive, seulement cinq publications ont été considérées adéquates. Chacune de ces études présentait des données quantitatives de fibres d’amiante dans le sol et dans l’air. Un résumé des informations pertinentes tirées de ces cinq publications se trouve sous forme de fiches d’extraction aux annexes 1 et 2.

Les deux premières études retenues sont de type terrain (annexe 1). Elles se sont déroulées dans des milieux où l’activité humaine était responsable de la contamination du sol par de l’amiante. Pour ces études, l’échantillonnage de l’air a été réalisé en postes personnels et en postes fixes. Dans une des études (Perkins et coll., 2008), des travaux liés à la construction d’une route ont entraîné une mise en suspension des fibres dans l’air. Dans l’autre étude (Januch et McDermott, 2004), des fibres ont été échantillonnées dans l’air à la suite d’une simulation de divers travaux tels que le râtelage, le pelletage et l’excavation d’une tranchée. Cette dernière étude contenait également un volet expérimental réalisé à partir d’un échantillonnage de l’air obtenu à la suite de l’agitation d’échantillons de sol dans des boîtes en acier inoxydable.

Les trois autres études étaient de nature expérimentale ou combinaient l’expérimental et le terrain. Elles sont rapportées à l’annexe 2. La première étude (Addison et coll., 1988) a été conduite dans des conditions de pire scénario (worst case) et consistait à agiter en chambre des mélanges artificiels de sols et d’amiante friable de concentrations connues. Les auteurs de la deuxième étude (Jones et coll., 2010) ont utilisé, pour l’agitation en chambre, un mélange artificiel amiante/sol, et également des échantillons provenant de sols contaminés par de l’amiante. Enfin, dans la troisième étude (Swartjes et Tromp, 2008), les chercheurs ont utilisé plus de mille mesures tirées de la littérature, principalement de type terrain, en plus de leurs propres résultats d’analyse en chambre expérimentale (Tromp, 2002).

4.1 Études de terrain

4.1.1 Évaluation de l’exposition des travailleurs lors de la construction d’une route avec du gravier contenant de l’amiante

Perkins et coll. (2008) ont évalué les expositions des travailleurs et du public lors d’un projet de réparation et de reconstruction d’une route non pavée en Alaska où l’on retrouvait des matériaux contenant de l’amiante amphibole (trémolite et actinolite). Les auteurs précisent que cet amiante (trémolite) était sous forme de veines brisées dans une matrice renfermant d’autres minéraux. Cette matrice, du gravier, était défaits en morceaux, poussée, puis chargée dans des camions, de sorte que l’amiante pouvait être distribué de manière hétérogène sur la route, tel que mis en évidence par les résultats. Des analyses de matériaux en vrac (gravier), de poussières déposées et d’échantillons d’air ont été réalisées.

Matériaux en vrac (gravier)

Sept échantillons de la couche de gravier provenant de l’aire d’habitation des travailleurs et 10 échantillons de gravier composant la route prélevés à des intervalles d’un demi-mille (environ

800 m) ont été analysés par microscopie optique à lumière polarisée (MOLP) selon le protocole de l'Environmental Protection Agency (OEME, 2005). Pour la zone d'habitation des travailleurs, un seul échantillon contenait de la trémolite (moins de 1 %) tandis qu'aucune fibre d'amiante n'a été détectée dans les autres échantillons. Des 10 échantillons prélevés sur la route, quatre contenaient 0,1 % de trémolite, un renfermait 0,4 % de trémolite et 0,1 % d'actinolite tandis que les résultats pour cinq autres étaient sous la limite de détection.

Poussières déposées

Au total, 24 échantillons de poussières déposées, soit 15 provenant de l'intérieur des véhicules récréatifs (VR) et neuf des cabines de bulldozers et de pelles rétrocaveuses, ont été récoltés par microaspiration et analysés selon la méthode ASTM D5755-95 (ASTM International, 1995).

Toutes les fibres dont la longueur était supérieure à 5 μm ont été prises en compte pour les analyses par microscopie électronique à transmission (MET). Ainsi, 93 % des échantillons provenant des VR et 77 % de ceux prélevés dans les cabines avaient une concentration supérieure à 100 000 structures d'amiante/ cm^2 , une concentration considérée comme pouvant être élevée (Millette et Hays, 1994). Cependant, selon Perkins et coll. (2008), il n'existe pas d'algorithme pour calculer les concentrations de fibres aéroportées à partir de leurs concentrations dans les poussières déposées, d'où l'importance de mesurer leur teneur en raison de leur potentiel de remise en suspension dans l'air.

Des traces de chrysotile ont été trouvées dans les poussières déposées, ce qui indique que la contamination ne provenait pas seulement de la route, où cette variété d'amiante n'avait pas été détectée. Comme plusieurs VR étaient utilisés depuis de nombreuses années sur des chantiers variés, des poussières contenant des fibres d'amiante ont donc pu s'y accumuler.

Échantillons d'air prélevés en postes personnels

Des pompes placées en zone respiratoire des travailleurs ont permis d'obtenir 610 mesures d'exposition quotidienne moyenne (EQM) dont la durée moyenne d'échantillonnage était de 4,1 h, et 51 mesures d'exposition de courte durée (CD) d'une durée moyenne d'échantillonnage de 39,5 min. Les échantillons d'air ont été analysés par microscopie optique à contraste de phase (MOCP) selon la méthode NIOSH 7400 (NIOSH, 1994a) et 36 échantillons choisis au hasard ont aussi été analysés par MET selon la méthode NIOSH 7402 (NIOSH, 1994b).

Les résultats ont d'abord été divisés en deux groupes, soit ceux au-dessus de 0,1 f/cm^3 , la limite d'exposition permise (permissible exposure limit - PEL) de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), et ceux au-dessus de la limite de détection, mais sous 0,1 f/cm^3 . La moyenne des mesures EQM du premier groupe (n=16) était de 0,18 f/cm^3 , alors que celle du deuxième groupe (n=371) était de 0,028 f/cm^3 . Quarante-quatre échantillons n'ont pas pu être analysés en raison d'une surcharge de poussières tandis que les résultats pour 177 échantillons étaient sous la limite de détection. Pour les échantillons CD, la moyenne pour le premier groupe (n=8) était de 0,18 f/cm^3 et celle pour le deuxième groupe (n=7) était de 0,07 f/cm^3 .

Les résultats combinés (EQM et CD) ont ensuite été répartis selon la nature de la tâche. La moyenne la plus haute, soit 0,276 f/cm^3 , était associée aux opérateurs de niveleuse (n=87), suivis de près par les inspecteurs du Département des transports (n=46) avec une moyenne de

0,260 f/cm³. Pour plusieurs autres tâches, par exemple celles exercées par les signaleurs ou les opérateurs de rouleau compacteur, les concentrations (n=286) étaient sous la PEL de 0,1 f/cm³. L'exposition la plus élevée obtenue par MOCP était de 0,59 f/cm³, soit près de six fois la PEL de 0,1 f/cm³, et elle a été mesurée dans la cabine de l'opérateur de niveleuse. Selon la caractérisation réalisée par MET, en moyenne 40 % des fibres analysées étaient des fibres d'amiante, ce qui résulterait en une EQM de 0,24 f/cm³. La fonction de la niveleuse étant de gratter, couper et niveler la surface de la route en enfonçant sa lame jusqu'à six pouces dans le lit de gravier, une grande quantité de poussières est ainsi générée et peut atteindre la cabine de l'opérateur.

De plus, un échantillon d'air en zone respiratoire a été prélevé pour chacun des opérateurs de bulldozers et de pelles rétrocaveuses. Les bulldozers brisaient la surface du sol et poussaient les débris et les pelles rétrocaveuses chargeaient le gravier dans des camions. L'échantillonnage était de courte durée, entre 20 et 30 min. Les résultats par MOCP pour les opérateurs de bulldozers étaient, pour plusieurs, au-dessus de la PEL, alors que les résultats par MET se situaient près de la PEL, compte tenu que toutes les fibres comptées par MOCP ne sont pas de l'amiante. Les auteurs mentionnent que si les opérateurs avaient effectué la même tâche pendant huit heures, leur exposition auraient été au-dessus de la PEL.

Neuf échantillons d'air en zone respiratoire ont été obtenus en simulant, selon le pire scénario, l'exposition des automobilistes empruntant la route et qui conduisaient leur véhicule dont les fenêtres étaient ouvertes en suivant des camions produisant des nuages de poussières. Les échantillons ont été analysés par MOCP selon la méthode NIOSH 7400 (NIOSH, 1994a). Deux échantillons ont donné une concentration au-dessus de 0,1 f/cm³, dont la plus élevée atteignait 0,134 f/cm³, mais il s'agissait d'un prélèvement de courte durée (CD). Répartis sur huit heures, les résultats d'EQM étaient en moyenne de 0,049 f/cm³, soit l'équivalent de la moitié de la PEL. Les résultats étaient variables et les auteurs suggèrent que cette hétérogénéité pourrait être attribuable à une distribution inégale de l'amiante sur la surface de la route.

En résumé, les auteurs de cette étude concluent que l'exposition des travailleurs sur le site était mesurable, mais qu'en général les résultats étaient faibles, soit en dessous de la PEL de l'OSHA de 0,1 f/cm³, pour la plupart des tâches associées à la construction de routes avec du gravier contenant de l'amiante.

4.1.2 Étude de la contamination sur le site d'une usine d'exfoliation de vermiculite

Januch et McDermott (2004) ont conduit une évaluation de la contamination par l'amiante sur le site d'une ancienne usine d'exfoliation de la vermiculite à Spokane, dans l'État de Washington. La vermiculite transformée à cet endroit provenait de Libby (au Montana), connue pour sa contamination par des amphiboles. La vermiculite concentrée, les résidus issus de l'exfoliation et ceux provenant des produits d'isolation manufacturés sur le site avaient été balayés à l'extérieur et utilisés pour du remplissage. La firme chargée de nettoyer le site avait préalablement prélevé 35 échantillons de sol. Les résultats avaient montré la présence de traces d'amiante dans quelques échantillons, deux d'entre eux contenaient 2 % d'amiante alors qu'un en renfermait 3 %. Ces résultats ont été considérés dans la détermination des sites d'échantillonnage. L'étude s'est

déroulée en trois phases afin de déterminer si des fibres d'amiante pourraient être remises en suspension à la suite de l'agitation du sol.

Pendant la première phase, 13 échantillons de sol ont été prélevés à différents endroits suspectés d'être contaminés par la vermiculite après inspection visuelle du terrain et ont été analysés par MOLP et par diffractométrie de rayons X. La majorité des fibres d'amiante identifiées étaient des amphiboles; le chrysotile a également été mis en évidence.

Lors de la phase 2, 12 échantillons de sols ont été collectés aux mêmes endroits que pour la phase 1, séchés, puis agités dans une boîte en acier inoxydable. Les analyses réalisées par MOCP selon la méthode NIOSH 7400 (NIOSH, 1994a) et par MET selon la méthode NIOSH 7402 (NIOSH, 1994b) prenaient en compte les fibres dont la longueur était supérieure à 5 μm . Dix des 12 échantillons de sol ont généré des concentrations de fibres d'amiante dans l'air variant entre 0,051 et 10,713 f/cm^3 , dont plus de 70 % dépassaient la limite d'exposition permise (PEL) de 0,1 f/cm^3 .

Finalement, la phase 3 avait pour but de déterminer si l'amiante contenu dans le sol pouvaient être libéré sous forme de fibres aéroportées lorsque des travailleurs agitaient le sol lors d'une simulation de travail. Au total, 32 échantillons d'air ont été obtenus dont 12 prélevés en postes personnels pour les analyses par MET, six en postes personnels pour les analyses par MOCP, sept en postes fixes (six analysés par MET et un analysé par MOCP) et sept pour l'assurance qualité et les blancs (cinq échantillons analysés par MET et MOCP). Les analyses des échantillons en postes personnels étaient effectuées selon la méthode NIOSH 7402 alors que celles sur des échantillons en postes fixes étaient réalisées selon la méthode ISO 10312 (ISO, 1995), utilisée pour l'identification directe de l'amiante dans les échantillons aéroportés. Les échantillons en postes fixes étaient collectés à l'aide de cassettes suspendues à quatre pieds au-dessus du sol. Les travailleurs étaient répartis sur deux sites. Durant l'échantillonnage, le vent provenait du nord et de l'ouest, à une vitesse estimée entre 0 et 5 milles/h (entre 0 et 8 km/h).

Au premier site, les travailleurs effectuaient des travaux d'entretien général tels que la tonte, le pelletage, le râtelage, le labourage et le soufflage de feuilles. Le sol était sec et devenait humide à une profondeur d'environ 3-4 pouces (8-10 cm), mais le taux d'humidité n'a pas été mesuré. Pour les prélèvements en postes personnels, trois échantillons analysés par MOCP ont donné des concentrations de fibres entre 0,11 et 0,25 f/cm^3 tandis que six échantillons analysés par MET ne contenaient pas de fibres d'amiante. Un échantillon prélevé en poste fixe contenait une fibre d'amiante chrysotile et trois fibres d'amiante amphibole alors qu'un autre contenait une seule fibre de chrysotile.

Au second site, les travailleurs avaient excavé une tranchée d'environ 15 pieds de longueur par trois pieds de profondeur par deux pieds de largeur à l'aide d'un tracteur de moyenne dimension équipé d'une pelle rétrocaveuse. Un souffleur à feuilles était utilisé pendant l'excavation pour simuler le vent et assécher le sol humide. Les résultats par MET variaient entre 0,01 et 0,045 f/cm^3 . Trois échantillons provenant des postes personnels et analysés par MOCP contenaient des fibres à des concentrations variant entre 0,02 et 0,045 f/cm^3 . Au total, neuf échantillons en postes personnels étaient sous le seuil de détection. Un échantillon provenant d'un poste fixe contenait trois fibres amphiboles. Environ 52 % des fibres d'amiante aéroportées

provenant des deux sites avaient un rapport longueur:diamètre plus grand ou égal à 20:1 et environ 15 % des fibres comptées étaient plus longues ou égales à 20 µm.

Ainsi, les résultats ont montré qu'aux sites investigués, lorsque le sol était remué, des fibres d'amiante étaient effectivement libérées dans l'air et que, lors d'activités d'entretien simulées, les concentrations de fibres dans l'air pouvaient atteindre 0,25 f/cm³, soit 2,5 fois la PEL. De plus, les résultats des essais lors de l'agitation de ces mêmes échantillons de sol en chambre expérimentale témoignaient d'une grande variabilité des résultats au regard du nombre de fibres d'amiante aéroportées, soit de non détectés à 10,713 f/cm³.

4.2 Études expérimentales

4.2.1 *Pire scénario : Étude expérimentale réalisée avec des mélanges artificiels*

L'étude d'Addison et coll. (1988) a été réalisée dans des conditions de pire scénario, en utilisant des mélanges artificiels d'amiante friable et de sol ne contenant pas de fibres asbestiformes. Elle comportait trois objectifs. Le premier visait à établir les niveaux de poussières et de fibres d'amiante générés dans l'air à partir de sols contaminés par une faible quantité d'amiante. Le second portait sur la relation entre les concentrations dans l'air de fibres d'amiante et de poussières et leurs variations en fonction des changements dans les proportions d'amiante dans le sol, la nature du sol et le type d'amiante. Le dernier objectif consistait à évaluer l'effet du taux d'humidité du sol sur les concentrations de poussières et de fibres d'amiante aéroportées, dans l'optique d'établir des techniques de suppression efficaces sur un site pouvant générer des poussières.

Des chambres expérimentales ont été utilisées pour la génération de poussières aéroportées. Trois types de sol ont servi à la préparation des mélanges, soit un sol argileux, un sol sablonneux et un sol intermédiaire contenant du sable et de l'argile. La granulométrie des sols était inférieure à 5 µm. À ces sols ont été ajoutés trois types d'amiante (chrysotile, amosite et crocidolite) à des concentrations variables (1 %, 0,1 %, 0,01 % et 0,001 %, en poids). En parallèle, l'effet de l'humidité du sol sur la libération de fibres d'amiante aéroportées a été testé dans des chambres expérimentales de 0,9 m³, avec des mélanges dont le taux d'humidité variait de 0 à 50 % ([poids de l'eau/poids du sol]*100 %).

L'échantillonnage gravimétrique des poussières respirables (< 5 µm) a été effectué avec un appareil MRE 113A (Dunmore et coll., 1964), alors que les poussières totales ont été mesurées à l'aide de l'élutriateur vertical IOM (Beckett, 1975). Pour la détermination de la concentration de fibres dans l'air, des filtres en membrane de nitrate de cellulose d'une porosité de 0,8 µm ont été utilisés pour les analyses par MOCP et des filtres en polycarbonate Nuclepore d'une porosité de 0,4 µm ont servi à l'évaluation par microscopie électronique à balayage (MEB). Pour mesurer l'effet du taux d'humidité du sol sur la concentration de fibres dans l'air, les échantillons ont été collectés sur un filtre en membrane de nitrate de cellulose d'une porosité de 0,8 µm à l'aide d'échantillonneurs à cassette ouverte dirigée vers le bas (MDHS 39, 1988).

Parmi tous les types de sol, peu importent leurs concentrations d'amiante, ceux contenant du chrysotile ont libéré les plus basses concentrations de fibres (de 0,06 à 6,1 f/cm³), suivis par ceux

contenant de l'amosite ($0,1$ à $12,6$ f/cm³) et finalement ceux renfermant de la crocidolite qui ont donné les concentrations de fibres les plus élevées ($0,17$ à $13,8$ f/cm³).

Pour tous les types d'amiante, peu importent leurs concentrations, les sols sablonneux ont généré les plus hautes concentrations de fibres ($0,07$ à $15,9$ f/cm³) alors que les sols argileux ont libéré les plus basses concentrations ($0,13$ à $6,6$ f/cm³).

La diminution de la concentration d'amiante dans le mélange a entraîné une concentration plus faible de fibres d'amiante dans l'air, d'un facteur 9 pour les concentrations de $1,0$ à $0,1$ % ($10,8$ à $1,19$ f/cm³), d'un facteur 3 pour les concentrations de $0,1$ à $0,01$ % ($1,19$ à $0,41$ f/cm³) et d'un facteur 4 pour les concentrations de $0,01$ à $0,001$ % ($0,41$ à $0,11$ f/cm³).

La concentration de fibres dans l'air diminue avec l'arrosage du sol. L'addition d'une faible quantité d'eau dans le sol (10 %) peut réduire la concentration de fibres aéroportées par un facteur 10 (ex. : passant de 1 à $0,1$ f/cm³). La quantité d'eau requise pour réduire la concentration de fibres aéroportées dépend beaucoup plus du niveau de contamination du sol que de la nature du sol. En effet, l'introduction des premiers $5 - 10$ % d'humidité a eu le plus grand effet sur la réduction de la concentration des fibres dans l'air. Cet effet a été observé particulièrement dans le cas de l'amosite (1 %) dans le sable, bien qu'un taux plus élevé d'humidité (50 %) ait été nécessaire pour que la concentration de fibres libérées soit réduite à un niveau inférieur à $0,01$ f/cm³. Finalement, pour les types de sol et d'amiante évalués, la concentration de fibres peut passer de 5 à $0,01$ f/cm³ en humidifiant le sol à 50 %, soit une baisse substantielle de l'ordre de 500 fois.

De plus, les mélanges de sol sec et d'amiante à une concentration aussi faible que $0,001$ % peuvent générer des concentrations de fibres dans l'air supérieures à $0,1$ f/cm³, pour des concentrations de poussières respirables élevées, soit près de la limite d'exposition de 5 mg/m³ fixée par le Health and Safety Executive (HSE, 1987). Addison et coll. (1988) recommandent une limite d'action à $0,001$ % d'amiante dans le sol, concentration au-dessus de laquelle des mesures devraient être prises pour minimiser l'exposition aux fibres aéroportées. La limite de détection de la méthode analytique choisie pour mesurer des concentrations d'amiante dans le sol devrait donc être inférieure à cette concentration ($0,001$ %).

Les auteurs ont conclu que, dans les conditions expérimentales de leur étude, même une petite concentration d'amiante dans un sol meuble et sec peut conduire à des concentrations élevées de fibres d'amiante aéroportées quand le sol est remué. Pour les concentrations de fibres d'amiante aéroportées normalisées en fonction de la concentration de poussières respirables, les résultats dépendent plus du contenu en amiante dans le sol que du type d'amiante et de la nature du sol. La concentration en amiante d'un sol sec apparaît donc comme un facteur important qui influence la concentration de fibres d'amiante aéroportées alors que la nature du sol et le type d'amiante ont un effet moindre. Basé sur le modèle log linéaire présenté dans leur étude, pour une concentration donnée en amiante dans le sol, les concentrations de fibres dans l'air peuvent varier d'un facteur 5 selon les différentes combinaisons type d'amiante/nature du sol (par exemple, chrysotile/argile en comparaison à crocidolite/sable).

4.2.2 Études expérimentales réalisées à partir d'échantillons de sols existants et de mélanges artificiels

4.2.2.1 Essais en laboratoire comparant les concentrations de fibres dans l'air à partir d'échantillons de sol de Libby, Montana

L'étude de Jones et coll., (2010) avait pour but premier de comparer les concentrations de fibres aéroportées en fonction des concentrations de poussières respirables dans l'air ($\text{f.mL}^{-1}/\text{mg.m}^{-3}$). Elle tentait également d'évaluer l'effet de l'humidité sur la libération des fibres. Elle a été réalisée à partir de quatre échantillons tirés de carottes de sol provenant de différents endroits de la ville de Libby, au Montana, où des déchets d'une mine de vermiculite auraient été déposés. Un mélange artificiel (1 % amosite/sable) préparé selon la méthode d'Addison et coll. (1988) a également été utilisé afin d'assurer la cohérence et la comparabilité des résultats des deux études.

Pour atteindre le premier objectif, des nuages de poussières ont été générés dans une chambre expérimentale de $0,8 \text{ m}^3$ semblable à celle employée par Addison et coll. (1988). La concentration de poussières respirables prélevée à l'aide de cyclone à un débit de $2,2 \text{ L/min}$ a été mesurée par gravimétrie. Trois échantillonneurs à cassette dirigée vers le bas avec filtres d'ECM ont été employés à des débits de $0,5$, 2 et 5 L/min pour la collecte des fibres. Les concentrations de fibres ont ensuite été mesurées par MOCP selon la méthode de comptage de l'Organisation mondiale de la santé (WHO, 1997). La MET a été utilisée selon la méthode 7402 du NIOSH (1994b) pour la détermination des concentrations de fibres d'amiante. Finalement, les fibres d'amiante contenues dans les échantillons de sol ont été identifiées en utilisant la MET et la microscopie électronique à balayage avec émission de champ (MEB-EC).

Une analyse semi-quantitative des sols contaminés selon la méthode de l'EPA (1993) a montré la présence de fibres d'amphibole winchite, à des concentrations variant de $0,75$ à $3,0 \%$ (winchite asbestiforme) et de 1 à $3,25 \%$ (winchite non asbestiforme), dans trois des quatre échantillons.

Les échantillons de sols secs provenant de Libby ont libéré moins de fibres que le mélange sec de 1% amosite/sable. Par exemple, l'échantillon 3, qui contenait approximativement la même quantité d'amiante que le mélange artificiel, a libéré moins d'un dixième de la concentration mesurée pour le mélange ($1,4 \text{ f.mL}^{-1}/\text{mg.m}^{-3}$ comparativement à $14,7 \text{ f.mL}^{-1}/\text{mg.m}^{-3}$). Ceci témoigne donc de l'influence de la nature du sol sur la libération de fibres d'amiante dans l'air.

Afin d'évaluer l'effet de l'humidité du sol, les taux ont été fixés à 0% , 5% et 10% puisque les résultats d'Addison et coll. (1988) avaient démontré un effet significatif avec l'ajout de 10% d'humidité à un sol sec sur la réduction des concentrations de fibres générées. Les tests ont été conduits en utilisant l'échantillon de sol de Libby ayant libéré le plus de fibres à un taux de 0% d'humidité, ainsi que le mélange de 1% amosite/sable. Les résultats ont montré que les concentrations de fibres d'amiante libérées diminuaient progressivement lorsque l'humidité du sol augmentait, soit $1,94 \text{ f/mL}$, $0,90 \text{ f/mL}$ et $0,04 \text{ f/mL}$ pour des taux d'humidité respectifs de 0% , 5% et 10% pour l'échantillon de sol de Libby. Avec le mélange amosite sable, la concentration de fibres libérées dans l'air est passée de $13,5$ à $0,08 \text{ f/mL}$, pour une augmentation d'humidité de 0 à 10% .

Dans cette étude, il a été conclu que les concentrations de fibres aéroportées sont généralement corrélées aux concentrations de fibres dans les échantillons de sol. Elles sont affectées par la nature du sol, le type d'amiante (lié ou non), le niveau de brassage du sol et son taux d'humidité. L'addition de 10 % d'humidité à n'importe quel mélange sec a eu un effet drastique sur la concentration de fibres aéroportées lorsque le sol est remué. Cette information revêt une grande importance puisqu'un sol couvert de végétation contient généralement plus de 10 % d'humidité alors qu'un sol sans végétation peut sécher très rapidement dans des conditions de chaleur et d'ensoleillement.

4.2.2.2 Évaluation des risques pour la santé humaine engendrés par l'amiante contenu dans les sols

Swartjes et Tromp (2008) présentent une analyse de plus de mille mesures tirées de la littérature (liste des publications non fournie par les auteurs) et de leurs propres expérimentations. Une première étude (Tromp, 2002) avait utilisé des échantillons de sable sec contenant des quantités d'amiante friable connues, dans des conditions de pire scénario. Pour la mise en suspension des fibres, les échantillons ont été exposés à une vitesse de vent (simulé par un ventilateur) de 3 à 5 m/sec. Des taux d'humidité variés, de 0 à 20 %, ont été utilisés. Les données d'Addison et coll. (1988) ont également été prises en compte dans cette étude.

Les données provenant des études de terrain tirées de la littérature ont été obtenues lors d'activités telles que la conduite sur des routes contaminées, le pelletage, le déchargement et le tamisage de sol humide renfermant un mélange d'amiante lié et friable. L'échantillonnage de l'air pendant ces activités a été réalisé en postes fixes et en postes personnels. Pour la plupart des résultats, l'analyse a été effectuée par MEB combinée à la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie selon la méthode ISO14966 (ISO, 2002). Les concentrations moyennes d'amiante sur les sites ont été déterminées par échantillonnage du sol selon le « Dutch standard protocol » NEN 5707 (NEN, 2003).

Les données utilisées, tant pour les concentrations d'amiante dans le sol que pour celles dans l'air, ne sont pas détaillées. Par contre, leur relation y est présentée sous forme graphique démontrant que la concentration de fibres d'amiante dans l'air augmente avec la concentration dans le sol.

Les résultats suivants, n'ayant pas été chiffrés dans l'article, ont été estimés à partir des graphiques. Dans les études expérimentales (pire scénario), les concentrations moyennes de fibres dans l'air variaient entre 0,0004 et 7 f/cm³ à la suite de manipulation d'échantillons de sols contenant entre 0,007 et 70 % de fibres d'amiante. Les résultats moyens des mesures faites avec des échantillons de sol contenant de l'amiante friable se situaient entre 0,00007 et 0,09 f/cm³ pour des concentrations dans le sol entre 0,009 et 50 %. Pour les concentrations dans le sol variant entre 0,0009 et 0,8 %, les concentrations dans l'air n'ont pas été détectées. Cependant, les intervalles de confiance à 95 % sont très larges. Par exemple, sur le terrain, en présence d'amiante friable, la concentration de fibres aéroportées la plus élevée pour un sol contaminé à 0,01 % est supérieure à la plus faible concentration dans l'air pour un sol contenant 1 % d'amiante. Pour les sols moins contaminés avec de l'amiante lié (<1 %), aucune fibre d'amiante aéroportée n'a été mesurée.

Les auteurs ont également considéré la distance de la source d’émission et concluent que des concentrations plus grandes que $0,1 \text{ f/cm}^3$ ne pourraient être mesurées que près de la source, et ce, lors d’activités intenses. En effet, pour un sol comportant 10 % d’amiante, les concentrations près de la source variaient entre $0,01$ et $0,1 \text{ f/cm}^3$ et diminuaient avec la distance pour s’abaisser à moins de $0,001 \text{ f/cm}^3$ à plus de 100 mètres de la source.

Les auteurs concluent que l’humidité du sol (0 à 20 %) et la nature du sol (sable ou mélange intermédiaire de sable et d’argile) influencent l’émission de fibres d’amiante. À l’extérieur, le taux d’humidité typique du sol est approximativement de 10 %. Ainsi, comparativement à un sol sec, la concentration de fibres aéroportées pour un sol avec une humidité de 10 % est au moins 10 fois inférieure.

ALEA CONTROLES

ALEA CONTROLES

5. DISCUSSION

Tel que mis en évidence dans les études retenues, plusieurs paramètres peuvent influencer la libération de fibres d’amiante dans l’air à partir d’un sol contaminé : type d’amiante, teneur en amiante, nature et friabilité des matériaux, nature du sol, humidité du sol, activités sur le site, proximité de la source d’émission et conditions météorologiques (figure 2).

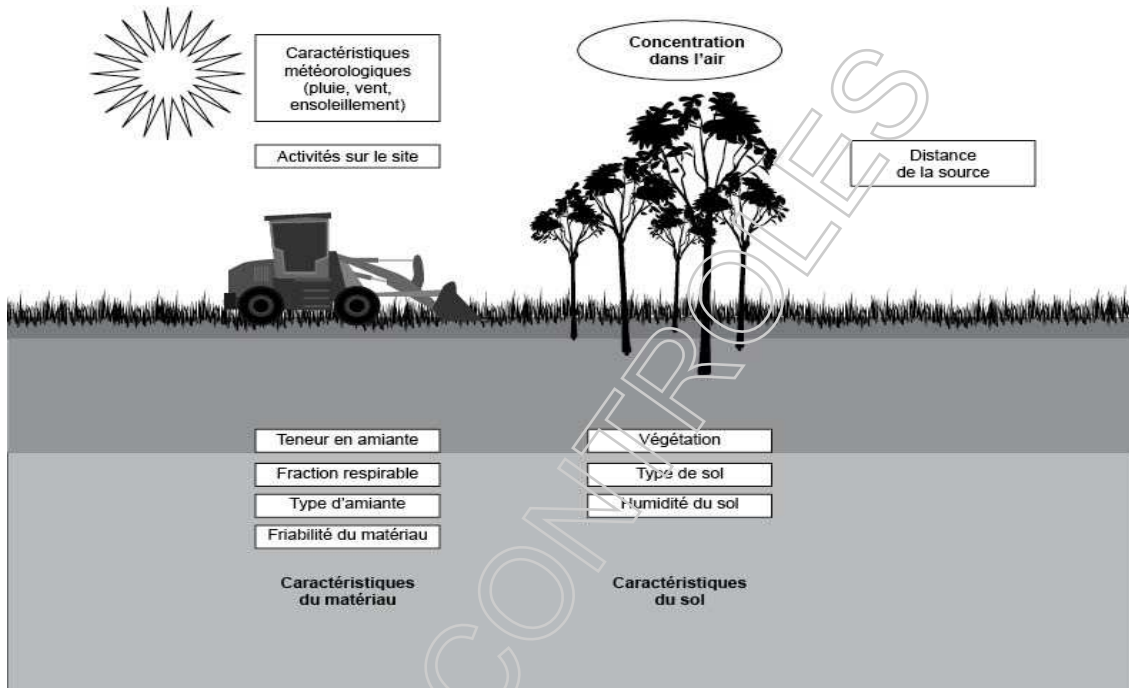


Figure 2 - Principaux paramètres impliqués dans la libération des fibres d’amiante.
(adaptée de Swartjes et Tromp, 2008)

Ces différents paramètres font l’objet d’une discussion à la section 5.1, selon leur impact sur la libération de fibres dans l’air. Les moyens de maîtrise et les équipements de protection individuelle sont présentés à la section 5.2. Finalement, les limites des études retenues, en termes de nombre et de variabilité des résultats, et celles des méthodes d’analyse, sont formulées au point 5.3.

5.1 Paramètres pouvant influencer la libération de fibres dans l’air

Seulement cinq études ont permis de répondre partiellement à l’objectif de cette recherche, en mettant en évidence l’impact plus prépondérant de certains paramètres (section 5.1.1) par rapport à d’autres dont l’influence semble moins importante (section 5.1.2). Finalement, certains paramètres n’ont pas été mesurés dans les études retenues, mais pourraient tout de même avoir un impact non négligeable (5.1.3). Le tableau 2 résume l’impact des différents paramètres sur la libération de fibres d’amiante dans l’air.

Tableau 2 – Paramètres ayant un impact sur la libération de fibres d'amiante dans l'air.

Impact mis en évidence	Impact variable	Impact potentiel non mesuré
Humidité du sol	Type d'amiante (amphibole/chrysotile)	Conditions météorologiques
Concentration d'amiante dans le sol	Nature du sol (sablonneux/argileux)	Couvert végétal
Activité sur le site (dérangement du sol)	Distance de la source d'émission	Friabilité des matériaux

5.1.1 Paramètres ayant un impact important sur la libération de fibres d'amiante dans l'air

5.1.1.1 Humidité du sol

Le degré d'humidité d'un sol est sans doute la caractéristique la plus importante, dont l'influence est déterminante sur la libération des fibres d'amiante dans l'air (Addison et coll., 1988; Swartjes et Tromp, 2008). En conditions expérimentales, les concentrations de fibres d'amiante libérées diminuent progressivement lorsque l'humidité du sol augmente. L'addition d'eau pour obtenir de 5 à 10 % d'humidité a un effet drastique sur la génération des fibres aéroportées lorsque le sol est remué et peut réduire les concentrations de fibres dans l'air par un facteur 10 (Jones et coll., 2010; Addison et coll., 1988). Pour les types de sol étudiés, la concentration de fibres peut être réduite de l'ordre de 500 fois (5 f/cm^3 à moins de $0,01 \text{ f/cm}^3$) par l'ajout de 50 % d'eau dans le sol, en particulier en présence d'amosite. Les sols sablonneux demanderaient plus d'eau que les autres types de sol, à teneur égale en amiante, mais cette hypothèse mériterait d'être vérifiée (Addison et coll., 1988).

5.1.1.2 Activités sur le site

Selon l'EPA (2008b), un autre paramètre déterminant est l'importance du remuement du sol, qui est associé aux activités sur le site. La libération de fibres dans l'air est peu probable lorsqu'un sol contenant de l'amiante n'est pas remué. La concentration de fibres d'amiante prélevé en postes personnels est directement liée à la production de poussières générées par une activité.

L'étude de Perkins et coll. (2008) sur l'évaluation des travailleurs selon la nature de la tâche a montré que les opérateurs de niveleuse étaient les plus exposés, avec une concentration moyenne de $0,276 \text{ f/cm}^3$, sur une période de huit heures. D'autres travailleurs présents dans cet environnement, tels que des inspecteurs, pouvaient également être exposés à des niveaux similaires. Les opérateurs de bulldozer remuaient le sol de façon importante et pouvaient être exposés sur de courtes durées (une quarantaine de minutes) à des concentrations variant de $0,011$ à $0,189 \text{ f/cm}^3$.

Une autre étude réalisée lors d'activités simulées d'excavation et de maintenance a également montré l'effet du remuement du sol sur la libération de fibres d'amiante dans l'air avec des concentrations pouvant atteindre $0,045 \text{ f/cm}^3$ et $0,25 \text{ f/cm}^3$ respectivement (Januch et McDermott, 2004).

5.1.1.3 Concentrations d'amiante dans le sol

Il a été montré expérimentalement qu'à un même niveau de remuement d'un sol sec contenant de l'amiante friable, c'est la teneur en amiante dans le mélange qui est le facteur le plus important, jouant sur la libération de fibres dans l'air (Addison et coll., 1988). Ainsi pour une diminution d'un facteur 1000 des teneurs en amiante dans le sol (de 1 à 0,001 %), les concentrations de fibres dans l'air ont diminué d'un facteur 100, soit de 10,8 à 0,11 f/cm³.

Dans l'environnement extérieur, la distribution de l'amiante dans les sols contaminés par du remplissage est généralement hétérogène, contrairement aux échantillons de sol utilisés dans les études expérimentales. Dans les études retenues, cette hétérogénéité a été démontrée par la grande variabilité des résultats d'échantillonnage des sols (Januch et McDermott, 2004; Perkins et coll., 2008; Swartjes et Tromp, 2008; Jones et coll., 2010). Or, l'étude d'un site requiert des prélèvements de plusieurs échantillons de sol à des endroits et à des profondeurs différentes, ce qui permet une représentativité de la contamination pour l'ensemble du site (EPA, 1997).

5.1.2 Paramètres ayant un impact variable sur la libération de fibres d'amiante dans l'air

5.1.2.1 Nature du sol

En conditions expérimentales, l'effet de la nature du sol sur la libération de fibres d'amiante dans l'air semble être un facteur moins important que la concentration d'amiante dans le mélange. Il a été cependant démontré expérimentalement qu'un sol sablonneux entraîne l'émission de plus de fibres dans l'air qu'un mélange sable-argile ou que l'argile seule (Addison et coll., 1988).

5.1.2.2 Type d'amiante

En conditions expérimentales, le type d'amiante contenu dans les sols peut exercer une influence sur l'émission des fibres dans l'air. Les sols contenant de la crocidolite ou de l'amosite peuvent libérer au-dessus de deux fois plus de fibres que ceux renfermant du chrysotile, et ce, pour une même concentration d'amiante dans un sol de même nature (Addison et coll., 1988). En ce qui concerne l'amosite, des mesures effectuées dans le cadre de chantiers de démantèlement d'amiante ont montré une relation, bien que faible, entre sa concentration dans les matériaux et la concentration de fibres dans l'air. Par contre, lorsque l'amosite est présente dans les matériaux sous forme de mélange de plusieurs types de fibres, par exemple avec du chrysotile, aucune relation n'a pu être établie (Dufresne et coll., 2009b).

5.1.2.3 Distance de la source d'émission

Selon le modèle d'émission PLUIM-PLUS (validé pour les gaz, les aérosols et les particules inférieurs à 10 µm), pour un sol contenant 10 % d'amiante, les concentrations près de la source se situeraient entre 0,01 et 0,1 f/cm³ et diminueraient de dix à cent fois avec la distance, pour s'abaisser au-dessous de 0,001 f/cm³ à plus de 100 mètres de la source (Swartjes et Tromp, 2008). Des concentrations supérieures à 0,1 f/cm³ ne pourraient être mesurées qu'à proximité de la source d'émission et lors d'activités intenses telles que l'excavation et le déversement de sol.

Driee et coll. (2010) rapportent également l'influence de la distance de la source sur les concentrations de fibres aéroportées, en se référant aux résultats d'une étude néerlandaise (Boeft, 1987). Dans cette étude, l'échantillonnage de l'air a été effectué à 5 m, 100 m et 1000 m d'une route où des résidus contenant de l'amiante avaient été utilisés en tant que matériau durcissant. À 5 m, les concentrations moyennes étaient de $0,001674 \text{ f/cm}^3$ et diminuaient d'environ 25 fois à 100 m pour atteindre $0,000068 \text{ f/cm}^3$. Les résultats à 1000 m, considérés comme bruit de fond, ne différaient pas statistiquement des résultats à 100 m.

5.1.3 Paramètres dont l'impact sur la libération de fibres d'amiante dans l'air n'a pas été mesuré dans les études retenues

5.1.3.1 Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques peuvent causer la dégradation des matériaux contenant de l'amiante (MCA) lorsqu'exposés continuellement à diverses conditions telles que les pluies acides, le soleil, le vent, le gel et les polluants atmosphériques. Dans ces conditions, la surface de ces matériaux s'altère, ce qui entraîne la libération de particules de ciment, de fibres d'amiante et d'agglomération de particules de ciment et de fibres dans l'air, le sol et l'eau (INSPQ, 2003).

Une seule des cinq études retenues (Januch et McDernott, 2004) a mesuré partiellement les conditions météorologiques, soit la vitesse et la direction du vent, sans pourtant en évaluer l'influence sur la libération de fibres dans l'air.

Une étude de l'Institut de veille sanitaire (INVS) dont l'objectif était d'évaluer les expositions environnementales à l'amiante a conclu que les concentrations mesurées au niveau des affleurements de roches amiantifères et à quelques dizaines ou centaines de mètres de ceux-ci, étaient nulles à très faibles lorsque seul le facteur éolien était en cause (Daniau et coll., 2008).

Cependant, dans un tout autre contexte, une étude de l'EPA (2008a) a évalué l'exposition à l'amiante de randonneurs (échantillonnage personnel) dans la région de Clear Creek, en Californie. Il a été observé que les concentrations de fibres d'amiante dans l'air étaient plus faibles lorsqu'il pleuvait au moment de l'échantillonnage. Ainsi, les précipitations peuvent avoir une influence directe sur la libération de fibres d'amiante dans l'air.

5.1.3.2 Couvert végétal

Un sol couvert de végétation contient généralement plus de 10 % d'humidité et les surfaces sans végétation peuvent sécher et s'éroder lorsqu'exposées au vent, au soleil et à la chaleur et ainsi libérer plus facilement des fibres (Jones et coll., 2010). De plus, la pluie peut jouer un rôle indirect en accroissant l'humidité intrinsèque du sol associée au couvert végétal.

5.1.3.3 Friabilité des matériaux

Dans les sites d'enfouissement, les matériaux contenant de l'amiante provenant de la démolition sont des sources potentielles d'émission de fibres aéroportées, principalement lorsqu'il s'agit de matériaux friables (INSPQ, 2003). Lorsqu'un MCA peut être émiété, pulvérisé ou réduit en poudre manuellement, il est considéré comme friable. Les fibres d'amiante peuvent se détacher

du MCA et se propager dans l’air ambiant. Dans le cadre de cette étude, il n’a cependant pas été possible d’évaluer le rôle de la friabilité des matériaux sur la libération de fibres d’amiante dans l’air.

Dans un contexte d’exposition environnementale à l’amiante, Daniau et coll. (2008) ont mentionné que le critère de friabilité de la roche est un facteur majeur dans le potentiel d’émission de fibres à partir d’affleurements de roches amiantifères. Cette caractéristique intrinsèque de la roche, ne serait toutefois pas suffisante pour entraîner l’émission de fibres dans l’air. Toutefois les dérangements mécaniques du sol ou les déplacements de personnes sur l’affleurement pourraient résulter en des concentrations élevées de fibres dans l’air.

5.2 Moyens de maîtrise et équipements de protection individuelle

Comme moyen de maîtrise, seul le mouillage ou l’humidité du sol a été évalué dans les études consultées. Les concentrations de fibres d’amiante aéroportées diminuent progressivement lorsque l’humidité du sol augmente, tel que discuté à la section 5.1.1. Le mouillage des MCA semble donc être le moyen de maîtrise le plus couramment recommandé (Dufresne et coll., 2009a).

Les deux études de terrain répertoriées ont rapporté l’utilisation d’équipements de protection individuelle, sans toutefois en évaluer l’efficacité. Dans l’étude de Januch et McDermott, (2004), les travailleurs de la construction d’une route portaient des demi-masques avec filtres HEPA, des survêtements jetables ainsi que des couvre-chaussures. Pour les simulations de travaux d’entretien et l’excavation d’une tranchée, les travailleurs étaient protégés par un masque, un survêtement jetable et des gants (Perkins et coll., 2008).

5.3 Limites de la recherche

5.3.1 Nombre d’études et variabilité des résultats

La limite la plus importante de cette recherche réside dans le peu d’études publiées permettant d’examiner le lien entre la teneur d’amiante dans le sol et les concentrations résultantes dans l’air dans un contexte de travail sur un site contaminé. Les cinq études retenues dans le cadre de notre travail ont montré des résultats très variables, ce qui rend difficile l’agrégation des résultats.

Selon les études d’Addison et coll. (1988) et de Jones et coll. (2010), il serait possible d’estimer la concentration d’amiante dans l’air à partir d’un échantillon de sol, mais seulement en conditions expérimentales contrôlées, pour une faible quantité de sol, où la concentration en amiante est connue, et où la composition du sol et son taux d’humidité sont aussi des variables connues. En situation réelle, la composition du sol et sa concentration en amiante ne sont pas homogènes, de même que le taux d’humidité qui peut varier en fonction de la composition du sol, des conditions météorologiques telles que la pluie, l’exposition au vent ou au soleil, ou la présence de structures limitant l’effet de ces conditions météorologiques (viaduc, muraille, etc.). D’autres variables, telles que le type d’amiante, son niveau de friabilité et la nature des travaux effectués peuvent aussi influencer la libération des fibres aéroportées.

5.3.2 Méthodes d'échantillonnage et d'analyse

Les niveaux de contamination par l'amiante d'un sol ont été évalués par différentes méthodes d'échantillonnage et d'analyse. À ce jour, aucune méthodologie d'échantillonnage et d'analyse n'a été validée pour une utilisation systématique (EPA, 2008b) bien que quelques-unes aient été proposées (Davies et coll., 1996; EPA, 1997; Schneider et coll., 1998).

5.3.2.1 Échantillonnage

L'échantillonnage de l'air est la mesure la plus utile pour évaluer l'exposition potentielle des travailleurs à l'amiante (Cali et coll., 2006) tandis que l'échantillonnage en poste personnel (Januch et McDermott 2004; Perkins et coll., 2008; Swartjes et Tromp, 2003) est représentatif de l'exposition du travailleur échantillonné. De la même façon, l'échantillonnage du sol ne reflète pas l'exposition qui provient d'activités de remuement du sol et pouvant remettre en suspension des fibres d'amiante dans l'air. De plus, l'emploi de certaines techniques de préparation des échantillons (ex. : concassage et broyage) peut altérer la distribution des différentes formes et dimensions des structures d'amiante respirables, alors que le tamisage des échantillons pour enlever les plus gros morceaux comme les roches (Perkins et coll., 2008) peut entraîner une sous-estimation des concentrations en amiante; ces gros morceaux étant susceptibles de contenir de l'amiante pouvant être libéré lors du remuement du sol. L'échantillonnage du sol permet cependant de déterminer la présence d'amiante, d'en évaluer la quantité relative et d'en délimiter la contamination.

5.3.2.2 Analyse

Pour leur étude expérimentale, Addison et coll. (1988) ont généré, à partir des échantillons de sol, des concentrations élevées de poussières dans l'air (5 mg/m^3) à la suite du remuement du sol. Par contre, les concentrations de particules, en situations réelles de travail sont généralement beaucoup plus faibles (Jones et coll., 2010). Addison et coll. (1988) recommandent qu'à une concentration dans le sol égale ou supérieure à 0,001 %, des actions devraient être prises pour protéger les travailleurs exposés. Cependant, il faut être prudent avec ces études expérimentales réalisées dans des conditions de pires scénarios et éviter de généraliser, d'extrapoler ou de les appliquer à des situations réelles. En effet, les résultats d'échantillonnage de l'air dans un environnement fermé où tous les paramètres sont contrôlés sont peu représentatifs de ceux pouvant être obtenus en conditions réelles à des concentrations similaires de fibres d'amiante dans le sol. De plus, les méthodes d'analyse doivent permettre l'évaluation des concentrations d'amiante dans le sol à ces niveaux de concentration, mais les méthodes existantes ne permettent pas ce degré de précision. Par exemple, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et la diffractométrie de rayon X possèdent une limite de détection rapportée entre 0,1 et 1 %. D'autres méthodes pour l'analyse de l'amiante dans les échantillons en vrac, par exemple le comptage par points (EPA, 1993), pourraient offrir ce niveau de sensibilité, mais elles demeurent semi-quantitatives et leur précision reste à être démontrée.

Davies et coll. (1996) ont développé et validé une méthode ayant un degré d'exactitude et de précision qui puissent permettre l'évaluation de la contamination d'un sol par l'amiante à un niveau égal ou inférieur à 0,001 % en poids. Des échantillons préparés de talc, de vermiculite et de trois types de sol (sable, argile et mélange) contenant des concentrations d'amiante (trémolite,

amosite, crocidolite et chrysotile) entre 0,0001 et 0,1 % ont été utilisés afin de vérifier l'effet des types de sol et d'amiante sur les concentrations estimées. La méthode était basée sur l'identification, le comptage et la mesure de fibres par MOCP ou par microscopie électronique. Bien qu'elle soit adaptée aux études expérimentales, cette méthode ne s'applique pas aux échantillons qui contiennent des fibres d'amiante liées en amas ou de l'amiante en grande quantité. Elle est donc difficilement transposable pour l'analyse des sols contaminés par des matériaux contenant de l'amiante.

Aux États-Unis, un programme fédéral, le Superfund, a été mis en place en 1980 pour nettoyer les sites contaminés par des déchets dangereux non contrôlés pouvant compromettre la santé publique et l'environnement. Pour les besoins du programme, l'Agence de protection de l'environnement (EPA, 1997) a développé une méthode d'échantillonnage et d'analyse pour la détermination des concentrations de fibres d'amiante respirables pouvant être libérées par le sol et les matériaux en vrac retrouvés dans ce type de sites. Cependant, l'EPA (2008b) a précisé par la suite qu'aucune méthode validée n'existe pour la mesure quantitative précise de l'amiante dans le sol à des concentrations inférieures à 0,25 %.

La MOCP est la méthode standard utilisée en évaluation du risque (EPA, 2012). Elle permet le comptage des fibres respirables tel que défini par l'Organisation mondiale de la santé : soit des fibres dont la longueur est supérieure à 5 μm , ayant un diamètre inférieur à 3 μm et un rapport longueur:diamètre d'au moins 3:1 (WHO, 1997). Le diamètre minimal observé par MOCP est autour de 0,25 μm . Cette méthode n'est pas spécifique, car elle prend en compte toutes les fibres, amiante et autres, qui correspondent aux critères de comptage. Cependant, les fibres plus courtes que 5 μm et plus fines que 0,2 μm devraient aussi être prises en compte puisqu'elles peuvent avoir une signification toxicologique (Januch et McDermott, 2004), mais aussi pour évaluer la dégradation d'un MCA (AFSSET, 2009).

Le seul outil analytique permettant la caractérisation et le comptage des fibres d'amiante exclusivement, dans les intervalles de tailles et de formes qui peuvent potentiellement contribuer au risque est la MET. Bien que cette méthode ait été utilisée dans les études de l'EPA (Januch et McDermott, 2004; Perkins et coll., 2008; Jones et coll., 2010), les dimensions des fibres considérées étaient les mêmes que celles utilisées pour le comptage par MOCP.

Compte tenu des disparités entre les méthodes d'analyse, l'importance de statuer sur le choix d'une méthode, préférablement en microscopie électronique, s'impose pour documenter les différentes caractéristiques des fibres dans le sol et dans l'air, tant au regard de leur composition, de leur taille et de leur potentiel de séparation.

6. CONCLUSION

Cette recherche témoigne de la difficulté d’établir une relation entre les concentrations d’amiante dans le sol et dans l’air. Très peu d’études ont été réalisées à cet effet alors que la variabilité des résultats et la non-comparabilité des études terrain et des études expérimentales rendent ardue toute tentative d’établissement d’une telle relation.

Le taux d’humidité, la concentration en amiante du sol et l’importance des activités sur le site (qui est directement lié au remuement du sol), apparaissent comme étant les caractéristiques les plus influentes de la libération des fibres dans l’air. Avec une moindre importance, la nature du sol, le type d’amiante et la distance de la source d’émission peuvent également entraîner un certain impact. Enfin, les conditions météorologiques (pluie, vent et ensoleillement), la présence de couvert végétal et la friabilité des matériaux pourraient avoir un moindre impact sur l’émission de fibres d’amiante aéroportées.

Les informations scientifiques sont encore trop limitées pour déterminer avec assurance et précision la contribution du sol contaminé par de l’amiante aux concentrations de fibres dans l’air et, ultimement, à l’exposition des travailleurs. Toutefois, considérant que seul le taux d’humidité du sol est un paramètre sur lequel une action immédiate peut être portée pour minimiser la libération des fibres d’amiante dans l’air, il est fortement suggéré d’arroser les sols avant toute intervention et d’appliquer les principes généraux d’hygiène du travail pour assurer la protection des travailleurs.

ALEA

BIBLIOGRAPHIE

Addison, J., Davies, L. S. T., Robertson, A., Willey, R. J. (1988). The release of dispersed asbestos fibres from soils. TM/88/14. IOM.

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

Amandus, H. E., Wheeler, R., Jankovic, J., Tucker, J. (1987). The morbidity and mortality of vermiculite miners and millers exposed to tremolite-actinolite: Part I. Exposure estimates. *Am J Ind Med*, 11, 1-14.

Arksey, H., O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8, 19-32.

ASTM International (1995). Standard Test Method for Microvacuum Sampling and Indirect Analysis of Dust by Transmission Electron Microscopy for Asbestos Structure Number Concentrations (ASTM D5755-95). West Conshohocken, Pa.: ASTM International.

Beckett, S. T. (1975). The generation and evaluation of UICC asbestos clouds in animal exposure chambers. *Annals of Occupational Hygiene*, 18, 187-198.

Boeft, D. (1987). Asbestos concentrations near a with asbestos waste hardened road in Diepenheim (en néerlandais). R 87/155. Delft, Netherlands.

Cali, S., Scheff, P., Sokas, R. (2006). Illinois Beach State Park (IBSP): Determination of Asbestos Contamination in Beach Nourishment Sand. Final Report of Findings. Chicago, Ill.: Center of Excellence in Environmental Health (MC922), University of Chicago.

CSST (2014). Répertoire toxicologique/Fiche complète pour amiante. Repéré à http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=770602 {Dernière consultation : 27 janvier 2015}.

Daniau, C, Cosson J, Dor F (2008) Exposition environnementale à l'amiante chez les personnes riveraines d'affleurements de roches amiantifères en France continentale – Rapport final. Saint-Maurice (France) : Institut de veille sanitaire. 73 p. Repéré à http://www.cancer-environnement.fr/LinkClick.aspx?fileticket=zJMsvRFFJ_Y%3D&mid=480&tabid=88 {Dernière consultation : 2 février 2015}.

Davies, L., Wetherill, G., McIntosh, C., McGonagle, C., Addison, J. (1996). Development and Validation of an Analytical Method to Determine the Amount of Asbestos in Soils and Loose Aggregates. Rep. No. 83. Edinburgh: Institute of Occupational Medicine.

Driee, H. A. L., Siesling, S., Swuste, P. H. J. J., Burdorf, A. (2010). Assessment of cancer risks due to environmental exposure to asbestos. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 20, 478-485.

- Dufresne, A., Dion, C., Frielaender, A., Audet, E., Perrault, G. (2009a). Personal and static sample measurements of asbestos fibres during two abatement projects. *Bull Environ Contam Toxicol*, 82, 440-443.
- Dufresne, A., Drolet, D., Perrault, G., Lemay, F., Viau, S., Dion, C. (2009b). Relation entre la teneur en amiante dans les matériaux et la concentration de fibres dans l'air ambiant lors de travaux de démantèlement. Études et recherche, rapport R-600. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Repéré à <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-600.pdf> {Dernière consultation : 2 février 2015}.
- Dunmore, J. H., Hamilton, R. J., Smith, D. S. G. (1964). An instrument for the sampling of respirable dust for subsequent gravimetric assessment. *Journal of Scientific Instruments*, 41, 669-672.
- EPA (1993). Test method; Method for the determination of asbestos in bulk building materials. EPA/600/R-93/116. Washington, DC.
- EPA (1997). Superfund method for the determination of releasable asbestos in soils and bulk materials. EPA 540-R-97-028.
- EPA (2008a). Clear Creek Management Area: Asbestos Exposure and Human. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA (2008b). Framework for investigating asbestos-contaminated superfund sites. OSWER directive #9200.0-68. U.S. Environmental Protection Agency.
- EPA (2012). Clear Creek Management Area (CCMA) Asbestos Exposure and Risk Assessment - Frequently Asked Questions. Repéré à <http://www.atsdr.cdc.gov/noa/Asbestos-and%20Health.pdf> {Dernière consultation : 27 janvier 2015}.
- Expertise collective INSERM (1997). Les risques associés aux principales circonstances d'exposition à l'amiante. In *Effets sur la santé des principaux types d'exposition à l'amiante*. Paris: Éditions INSERM.
- Gianfagna, A., Oberti, R. (2001). Fluoro-edenite from Biancavilla (Catania, Sicily, Italy): Crystal chemistry of a new amphibole end-member. *American Mineralogist*, 86, 1489-1493.
- HSE. Health and Safety Executive (1987). Occupational exposure limits. In *HSE Guidance Note EH40/87*. London: HM Stationery Office.
- INRS (2013). Travaux en terrain amiantifère : Opérations de génie civil de bâtiment et de travaux publics : guide de prévention. Paris: INRS.
- INSPQ (2003). Fibres d'amiante dans l'air intérieur et extérieur: État de la situation au Québec. Institut Nationale de Santé Publique du Québec.

INSPQ (2009). Mise à jour des connaissances sur l'utilisation de l'amiante dans les produits en ciment. Institut National de Santé Publique du Québec.

ISO (1995). Ambient Air - Determination of Asbestos Fibres - Direct Transfer Transmission Electron Microscopy Method. ISO 10312. First edition.

ISO (2002). Air ambient - Détermination de la concentration en nombre des particules inorganiques fibreuses - Méthode par microscopie électronique à balayage. ISO 14966.

Januch, J., McDermott, K. (2004). Study of asbestos contamination of former vermiculite Northwest/W.R grace vermiculite exfoliation facility. Seattle, Wash.: États-Unis. Environmental Protection Agency (EPA).

Jones, A. D., Apsley, A., Clark, S., Addison, J., Van Orden, D. R., Lee, R. J. (2010). Laboratory tests to compare airborne respirable mass and fibre concentrations from soil samples from Libby, Montana. *Indoor and Built Environment*, 19, 286-297.

Mays, N., Roberts, E., Popay, J. (2001). Synthesising research evidence. Studying the Organisation and Delivery of Health Services: Research Methods (pp. 188-220). In Fulop P, Clarke AA, & Black A (Eds.), London: Routledge.

MDHS 39 (1988). Asbestos fibres in air. Sampling and evaluation by Phase Contrast Microscopy (PCM) under the Control of Asbestos at Work Regulations. Dans *Methods for Determination of Hazardous Substances*. Health and Safety Laboratory.

Millette, J., Hays, S. (1994). Levels of asbestos in dust. Dans *Settled Asbestos Dust-Sampling and Analysis*. CRC Press. New York, Lewis Publishers.

NEN (2003). Inspection, soil sampling and analysis of asbestos in soil and soil stockpiles (*en néerlandais*). The Netherlands: Ministry of VROM, Den Hague.

NIOSH (1994a). Asbestos and other fibers by PCM: Method 7400. In National Institute for Occupational Health and Safety (Ed.), *NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM)*. Fourth edition, Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services.

NIOSH (1994b). Asbestos by TEM, Method 7402. In National Institute for Occupational Health and Safety (Ed.), *NIOSH Manual of Analytical Methods*. Fourth edition ed., Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services.

OEME (Office of Environmental Measurement and Evaluation) U.S.EPA, R. 1. (2005). Standard Operating Procedure for the Screening Analysis of Soil and Sediment Samples for Asbestos Content. Washington, D.C.: EPA.

Perkins, R. A., Hargesheimer, J., Vaara, L. (2008). Evaluation of public and worker exposure due to naturally occurring asbestos in gravel discovered during a road construction project. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 5, 609-616.

Schneider, T., Davies, L., Burdett, G., Tempelmand, J., Puleddae, S., Jorgensena, O. et coll. (1998). Development of a method for the determination of low contents of asbestos fibres in bulk material. *Analyst*, 123, 1393-1400.

Swartjes, F. A., Tromp, P. C. (2008). A tiered approach for the assessment of the human health risks of asbestos in soils. *Soil & Sediment Contamination*, 17, 137-149.

Tromp, PC. (2002). Exploratory study on risks of exposure to asbestos in soil (*en néerlandais*). R 2002-78. Apeldoorn, The Netherlands, TNO.

WHO (1997). Determination of airborne asbestos fibre number concentrations: A recommended method by phase contrast optical microscopy (membrane filter method). ISBN 92 4 154496 1. Geneva.

WHO (1998). Environmental Health Criteria 203: Chrysotile Asbestos. Genève.

ALEA CONTROLES

ANNEXE 1 : FICHE D'EXTRACTION DÉCRIVANT LES ÉTUDES DE TERRAIN

Auteur(s)	Perkins et coll.	Januch et McDermott
Année	2008	2004
Moyens d'émission de fibres dans l'air	1- bulldozers Caterpillar D10 avec défonceuse: briser la surface du sol et pousser le matériel, pelles rétrocaveuses sur chenilles Hitachi EX400LC: charger le gravier dans des camions, circulation de véhicules lourds, niveleuses 2- simulation de l'exposition des automobilistes: conduite avec fenêtres ouvertes en suivant des camions produisant des nuages de poussières	<p><u>phase 1</u>: aucune</p> <p><u>phase 2</u>: dans les boîtes en acier inoxydable, sol agité avec une cuiller en acier inoxydable pendant plusieurs minutes jusqu'à la génération de poussière visible. Échantillonnage après 1 heure</p> <p><u>phase 3</u>: 1^{er} site: travaux d'entretien: tonte, pelletage, râtelage, labourage et soufflage de feuilles</p> <p>2^e site: tranchées 10-15 pieds par 2-3 pieds de profondeur et 1,5-2 pied de largeur. Souffleur à feuilles pour simuler le vent et assécher le sol</p>
Nombre de mesures: air	1- 610 EQM et 51 CD prélevés dans la zone respiratoire des travailleurs; une mesure/opérateur de bulldozer et de pelle rétrocaveuse 2- 9 échantillons mesurant l'exposition des automobilistes	<p><u>phase 1</u>: aucune</p> <p><u>phase 2</u>: 12 échantillons en duplicata</p> <p><u>phase 3</u>: 32 échantillons: 18 échantillonneurs personnels, 7 échantillonneurs stationnaires et 7 contrôle qualité et blancs</p>
Nombre de mesures: sol	7 mesures du gravier dans la section de l'aire d'habitation 10 mesures de sol provenant de la route	<p><u>phase 1</u>: 13 échantillons (~ 4 onces)</p> <p><u>phase 2</u>: 12 échantillons (~ pied cube) prélevés pour analyse en chambre expérimentale</p> <p><u>phase 3</u>: aucun</p>
Description des échantillons de sol	Aucun détail dans l'article Échantillons provenant de la route ont été recueillis à tous les demi-milles	<p><u>phase 1</u>: échantillons recueillis avec des cuillers en acier inoxydable prélavés et placés dans des pots en verre avec des couvercles de Teflon®, où des dépôts de vermiculite libre ou de déchets de vermiculite étaient visibles (3 sous plancher et à l'intérieur d'un mur de l'entrepôt; 10 du côté nord et est de l'entrepôt, autour d'un pont en ciment, dans le terrain au nord-est de l'entrepôt)</p> <p><u>phase 2</u>: recueillis dans des seaux en acier inoxydables (scellés pour le transport au laboratoire), aux mêmes endroits que les échantillons pour la phase 1. Spécimens séchés au four à 60°C pendant 8-12 h puis refroidis 12 h avant utilisation</p>
Nombre de mesures: poussières déposées	15 mesures dans les VR des travailleurs 9 mesures dans les équipements	na
Méthode(s) d'analyse: air	MOCP selon la méthode NIOSH 7400 36 échantillons choisis au hasard aussi analysés par MET, méthode NIOSH 7402	<p><u>phase 1</u>: na</p> <p><u>phase 2</u>: MOCP et MET selon la méthode ISO 10312 (similaire à NIOSH 7402)</p> <p><u>phase 3</u>: MOCP et MET</p>
Méthode(s) d'analyse: sol	MOLP selon l'EPA (Office of Environmental Measurement and Evaluation U.S. EPA, Region I: Standard Operating Procedure for the Screening Analysis of Soil and Sediment Samples for Asbestos Content, Washington, D.C.: EPA, 2005)	<p><u>phase 1</u>: MOLP (préparation des échantillons selon méthode SOP: EIA-INGASED2.SOP datée de novembre 1999 de l'EPA) et diffractométrie de rayons X (après lavage du sol à l'eau déminéralisée, amas de fibres identifiés dans 4 échantillons à l'aide d'un microscope, puis désagrégés dans un mortier après ajout d'isopropanol)</p>
Méthode(s) d'analyse: poussières déposées	MET selon la méthode ASTM D5755-95 et MOCP	na

Auteur(s)	Perkins et coll.	Januch et McDermott
Année	2008	2004
Dimensions des fibres considérées	longueur > 5 µm, largeur > 0,25 µm, rapport longueur-diamètre > 3:1	longueur > 5 µm, diamètre entre 0,2 et 3,0 µm, rapport longueur-diamètre ≥ 3:1
Distance de la source d'émission	en zone respiratoire	phase 1: aucun échantillonnage d'air phase 2: 14 pouces au-dessus de la surface de travail phase 3: stations à 4 pieds au-dessus du sol
Type d'amiante	trémolite et actinolite	chrysotile et amphibole friable
Concentrations d'amiante dans le sol	7 échantillons provenant de l'aire d'habitation: 6 négatifs, 1 contenait moins de 1 % de trémolite 10 échantillons provenant de la route: 4 contenaient 0,1 % de trémolite, 1 contenait 0,4 % de trémolite et 0,1 % d'actinolite, 5 négatifs	<u>phase 1</u> : présence d'amiante chrysotile et une majorité d'amphibole pas de quantification
Concentrations d'amiante dans l'air	Sur 610 échantillons EQM et 51 CD: 400 échantillons au-dessus de la limite de détection. 2 groupes de données: 1- au-dessus de 0,1 f/cm ³ , EQM: 0,18 f/cm ³ , CD: 0,18 f/cm ³ 2- au-dessus de LOD, en-dessous de 0,1 f/cm ³ , EQM: 0,028 f/cm ³ , CD: 0,07 f/cm ³ résultat le plus élevé: opérateur de niveleuse: 0,276 f/cm ³ 40 % des fibres comptées par MOCP = amiante Automobilistes: deux échantillons CD > 0,1 f/cm ³ ; EQM = 0,049 f/cm ³	<u>phase 2</u> : 10 des 12 échantillons contenaient des fibres d'amiante en suspension lorsque le sol a été agité, à une concentration variant entre 0,051 et 10,713 f/cm ³ <u>phase 3</u> : 1 ^{er} site : 3 échantillons (MOCP) variant entre 0,11 et 0,25 f/cm ³ 6 des échantillons analysés par TEM = pas de fibres 2 ^e site : 3 échantillons(MOCP) concentration variant entre 0,02 et 0,16 f/cm ³ MET : 3 échantillons variant entre 0,01 et 0,045 f/cm ³
Résultats: Concentrations d'amiante dans les poussières déposées	cabines des équipements: 77 % au-dessus de 100 000 structures/cm ² VR: 93 % au-dessus de 100 000 structures/cm ²	na
Autres observations mesurées	Aucune	<u>phase 3</u> : vent nord et ouest, vitesse estimée à 0-5 milles/heure (0-8 km/h) sol sec en surface, mais devenant plus humide à une profondeur de 3-4 pouces (8-10 cm)
Moyens de contrôle	port de demi-masques avec filtres HEPA, survêtements jetables, couvre-chaussures	port de masques, survêtements jetables, gants

na: non applicable

CD: courte durée

EQM: mesure d'exposition quotidienne moyenne

HEPA : High Efficiency Particulate Air (filtres à haute efficacité, arrêtant au moins 99,97 % des particules de diamètre supérieur ou égal à 0,3 µm² au premier passage).

MET: microscopie à transmission électronique

MOCP: microscopie optique à contraste de phase

MOLP: microscopie optique à lumière polarisée

VR: Véhicule récréatif

ANNEXE 2 - FICHE D'EXTRACTION DÉCRIVANT LES ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

Auteur(s)	Addison et coll.	Jones et coll.	Swartjes et Tromp
Année	1988	2010	2008
Moyens d'émission de fibres dans l'air	débit d'air constant pour maintenir la concentration de poussières à 5 mg/m ³ sol sec: génération de nuage de poussières aéroportées sol humide: projection d'air comprimé pour aérosoliser	sol sec: génération de nuages de poussières aéroportées sol humide: projection d'air comprimé	activités simulées par l'utilisation d'un ventilateur; conduite sur routes contaminées, pelletage, décharge et tamisage de sol humide renfermant un mélange d'amiante liée et friable
Nombre de mesures: air	combinaisons amiante/sol sec: 36 mesures effet des taux d'humidité sur les combinaisons amiante/sol: 248 (36 combinaisons amiante/sol, 7 humidité, 6 amosite/sable)	sol sec: 27 échantillons pour les sols 1, 2, 3, et 4 mélange amosite/sable 1 %: 5 échantillons pour tester l'effet de l'humidité: 24 échantillons provenant du sol 2 et 13 échantillons du mélange sable/amosite	non mentionné
Méthode(s) d'analyse: air	MOCP selon 2 méthodes: 1- European Reference Method ^a 2- Central Reference Scheme ^b MEB	MET selon la méthode du NIOSH 7402 et MEB-EC	MEB-SDE selon la méthode ISO14966 (ISO, 2002)
Méthode(s) d'analyse: sol	na	microscopie optique selon 2 méthodes: 1- méthode décrite dans le UK Health and Safety Executive document HSG248 2- méthode de l'EPA pour la détermination d'amiante dans les résidus de matériaux de construction	MEB-SDE selon la méthode ISO14966
Dimensions des fibres considérées	European Reference Method: longueur > 5 µm, diamètre < 3 µm, ratio longueur diamètre > 3:1 Central Reference Scheme: inclut les particules non-respirables > 3 µm de diamètre	selon les critères de l'EPA : longueur > 5 µm, diamètre entre 0,2 et 3,0 µm, rapport longueur-diamètre ≥ 3:1	non mentionné
Distance de la source d'émission	na	na	concentrations calculées jusqu'à 500 m en utilisant le modèle PLUIM-PLUS pour un sol contaminé à 100 000 mg/kg _{soil,dw} (10 %)
Type d'amiante	chrysotile, amosite et crocidolite friables	winchite/richterite imbriquée dans la vermiculite amosite friable dans le mélange de sable	chrysotile et amphibole friable et non-friable

Concentrations d'amiante dans le sol	concentrations expérimentales : 1 %, 0,1 %, 0,01 % et 0,001 % d'amiante chrysotile, amosite ou crocidolite dans un sol argileux, sablonneux ou intermédiaire	sol 1: 1,75 % winchite asbestiforme et 1 % winchite non-asbestiforme sol 2: 3 % winchite asbestiforme et 3,25 % winchite non-asbestiforme sol 3: 0,75 % winchite asbestiforme et 1,5 % winchite non-asbestiforme sol 4: pas de fibre amphibole détectée par microscopie optique	<u>1- pire scénario:</u> de ~ 7 mg/kg à ~ 700 000 mg/kg (~ 0,007 à ~ 70 %) <u>2- mesures sur le terrain avec de l'amiante friable:</u> de ~ 9 mg/kg à ~ 500 000 mg/kg (~ 0,009 à ~ 50 %) <u>3- mesures de terrain avec de l'amiante non friable:</u> de ~ 9 mg/kg à ~ 8000 mg/kg (~ 0,0009 à ~ 0,8 %)
Concentrations d'amiante dans l'air	<u>Type d'amiante:</u> - Chrysotile : de 0,06 à 6,1 f/cm ³ - Amosite : de 0,1 à 12,6 f/cm ³ - Crocidolite : de 0,17 à 13,8 f/cm ³ <u>Nature du sol :</u> - sable : 0,07 à 15,9 f/cm ³ - argile : 0,13 à 6,6 f/cm ³ <u>Concentration en amiante :</u> La réduction de la concentration d'amiante dans le mélange réduit la concentration de fibres mesurée : 1,0 à 0,1 % : ↓facteur 10 0,1 à 0,01 % : ↓facteur 3 0,01 à 0,001 % : ↓facteur 4 <u>Humidité:</u> L'introduction des premiers 5 à 10 % d'humidité = plus grand effet sur la réduction des fibres dans l'air Amosite : plus d'eau nécessaire pour arriver à 0,01 f/m ³ (ex. 50 % d'humidité pour 1 % d'amosite dans le sable)	<u>Concentration moyenne de fibres aéroportées mesurées par MOPC = concentration de fibres/ concentration de poussières respirables:</u> sol 1: 0,71 f ml ⁻¹ /mg.m ³ sol2: 6,6 f ml ⁻¹ /mg.m ³ sol 3: 1,4 f ml ⁻¹ /mg.m ³ sol 4: 0,013 f ml ⁻¹ /mg.m ³ mélange sable/amosite 1%: 14,7 f ml ⁻¹ /mg.m ³ <u>Humidité:</u> Mélange sable/amosite 1 %: 0 % d'humidité: 13,5 f/cm ³ 10 % d'humidité: 0,08 f/cm ³ sol 2: 0 % d'humidité: 1,94 f/cm ³ 5 % d'humidité: 0,90 f/cm ³ 10 % d'humidité: 0,04 f/cm ³	<u>1- pire scénario :</u> de ~ 400 fibres/m ³ à ~ 700 000 fibres/m ³ (~ 0,0004 à ~ 0,7 f/cm ³) <u>2- mesures sur le terrain avec de l'amiante friable:</u> de ~ 70 fibres/m ³ à ~ 90 000 fibres/m ³ (~ 0,00007 à ~ 0,09 f/cm ³) <u>3- mesures de terrain avec de l'amiante non friable:</u> concentrations nulles

na: non applicable

MEB-EC: microscopie électronique à balayage à effet de champ

MEB-SDE: microscopie électronique à balayage combinée à la spectroscopie à rayon X à dispersion d'énergie

MOCP: microscopie optique à contraste de phase

SDE: spectroscopie à rayons x à dispersion d'énergie

^a Health and Safety Executive. HSE Methods for the Determination of Hazardous Substances MDHS39. Asbestos fibres in air. Determination of personal exposure by the European Reference version of the membrane filter method (rev.). London: HM Stationery office. 1986

^b Crawford, NP et Thorpe, HL. "Effects of counting rule packages on the reproducibility of asbestos fibre counts". In: Proceedings Fourth International Colloquium on Dust Measuring Technique and Strategy. Edinburgh. London: Asbestos International Association: 45-49. 1982.