

**Agents fibrogènes et cancérogènes
dans les mines d'or et de fer du Québec**
Étude exploratoire

France Labrèche
Félix Gervais
Guy Perrault

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1031

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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.

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 des normes, de l'équité, 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 CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2018
ISBN : 978-2-89797-028-4
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
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
novembre 2018

Agents fibrogènes et cancérogènes dans les mines d'or et de fer du Québec

Étude exploratoire

France Labrèche¹, Félix Gervais² et Guy Perrault³

¹IRSST

²Polytechnique Montréal

³Consultant R et D

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1031



Avis de non-responsabilité

L'IRSST 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'IRSST 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.

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



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.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à reconnaître le travail de quelques personnes maintenant retraitées de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Chantal Dion a mené la préparation du protocole et la coordination des travaux, a participé à la revue des aspects d'expologie et de minéralogie, et a collaboré à la rédaction de ce rapport et à sa relecture; Ginette Truchon a participé également à la préparation du protocole, a effectué la revue des aspects toxicologiques et contribué à la rédaction d'une première version de ce rapport et à sa première lecture.

Les auteurs tiennent aussi à remercier Maryse Gagnon et Ginette Vadnais, bibliothécaires à l'IRSST, pour leur contribution à la recherche bibliographique. Des remerciements s'adressent également aux étudiants de Polytechnique Montréal pour la revue de la littérature géologique et l'analyse minéralogique des échantillons de roches : Élisabeth Côté, Mirka Chénier-Bellerive, Isabelle Dorais et Charles Kavanagh-Lepage. Finalement, nous exprimons notre reconnaissance aux compagnies minières ayant accepté de nous faire parvenir des échantillons de roches pour analyse minéralogique. La révision du texte et la mise en page du document ont été réalisées par Manon Lévesque, de l'IRSST.

SOMMAIRE

De récentes études ont mis en évidence que les travailleurs des mines d'or du Dakota et des mines de fer du Minnesota sont exposés à des particules minérales allongées (PMA). En particulier, les mineurs du Minnesota présentent un risque plus élevé de décès par cancer du poumon, par mésothéliome et par maladies cardiaques que la population générale. Comme l'intérêt renouvelé pour l'exploration de nouveaux gisements d'or et de fer dans le Nord-du-Québec laisse entrevoir une augmentation du nombre de travailleurs dans ces secteurs, il s'imposait de procéder à une première appréciation de ces milieux. Dans le but d'évaluer l'état des connaissances sur la présence des PMA dans les mines d'or et de fer du Québec et de déterminer leur contribution potentielle dans l'étiologie des cancers et des maladies pulmonaires, une étude intégrant différentes méthodes et disciplines a été entreprise pour répondre aux objectifs spécifiques suivants : (1) dresser le bilan des études épidémiologiques sur les cancers et les maladies pulmonaires chez les travailleurs des mines d'or et de fer; (2) réaliser le bilan des connaissances sur la toxicité des poussières de ces mines, en particulier des PMA amiantiformes et non amiantiformes; (3) décrire la géologie des mines d'or et de fer mondiales ayant fait l'objet d'études sanitaires et la comparer à celle des mines québécoises.

Une analyse des articles de la littérature internationale portant sur les agents fibrogènes et cancérogènes (et leurs niveaux d'exposition) dans les mines d'or et de fer a d'abord été réalisée. Cette analyse a identifié certaines régions pour lesquelles des cancers et des maladies pulmonaires d'origine professionnelle ont été rapportés chez les mineurs. En parallèle, une analyse des études toxicologiques portant principalement sur les PMA a fait ressortir différents paramètres de toxicité de ces particules. Une autre revue de la littérature a ensuite documenté les différents contextes géologiques des mines d'or et de fer des pays et régions identifiés dans les études épidémiologiques et une dernière recherche documentaire a exploré la présence de PMA d'amphiboles dans les mines d'or et de fer du Québec. Ces informations ont ensuite été complétées par la caractérisation minéralogique d'échantillons provenant des mines d'or et de fer québécoises pour déterminer si ces mines sont susceptibles de contenir des PMA d'amphiboles.

Les constats suivants ressortent de la revue des études épidémiologiques internationales. L'exposition à la silice est mentionnée dans toutes les études, tant pour les mines d'or que de fer, alors que le radon, l'arsenic ou les fumées de moteurs diesels ne sont signalés que dans une partie de ces études. L'exposition à des PMA n'a été mesurée ou estimée que dans deux études sur les mines d'or et une étude sur les mines de fer (taconite).

Pour les mineurs d'or, une augmentation statistiquement significative du risque de décéder d'un cancer du poumon a été mise en évidence, en association avec la durée de travail, l'empoussièrément général, la concentration de silice cristalline dans l'air et le travail en mines souterraines. Une augmentation du nombre de mésothéliomes (cancer généralement associé à l'exposition à l'amiante), de certains cancers des organes hématopoïétiques, de la prostate, de l'estomac et du colon, ainsi que du rectum a également été trouvée, mais en moindre proportion. Quant aux maladies respiratoires non cancéreuses, seules la silicose et les « pneumoconioses sans précision » montrent un risque élevé dans la majorité des études. Les deux études portant une attention particulière aux PMA n'ont pas trouvé de relation entre l'exposition aux poussières contenant des fibres et les cancers ou les maladies pulmonaires non cancéreuses.

Pour les mineurs de fer, une augmentation statistiquement significative du risque de décéder d'un cancer du poumon a été mise en évidence, en association avec la durée de travail et l'exposition à la silice, au radon et aux émissions de moteurs diesels. Une augmentation du nombre de mésothéliomes avec la durée d'emploi dans les mines de taconite et avec l'exposition cumulative aux PMA a été montrée dans les études américaines. Une augmentation de certains autres cancers (estomac, prostate, vessie, voies aérodigestives) a aussi été rapportée, mais disparaissait après ajustement pour le tabagisme. Quant aux maladies respiratoires non cancéreuses, un excès d'anomalies de la plèvre a été rapporté en association avec l'exposition cumulative aux PMA, et de décès par pneumoconiose et par bronchite chronique en association avec l'exposition à la silice. Les études américaines ont mis en évidence une augmentation du risque chez les travailleurs des mines de taconite, mais la relation entre l'exposition aux PMA et le risque de cancer du poumon n'existait plus après ajustement pour le sexe, l'exposition à la silice et à l'amiante et le travail dans les mines d'hématite.

Le contexte géologique des mines d'or québécoises rend la présence de PMA d'amphiboles très probable (ces mines se situent dans des ceintures de roches vertes archéennes). En effet, les PMA d'amphiboles de la série actinolite-trémolite sont des minéraux caractéristiques du faciès métamorphique atteint par les basaltes se retrouvant en abondance dans ces ceintures. La différence majeure entre le contexte québécois et celui du Dakota (où des PMA ont été mesurées) est l'association spatiale systématique entre les PMA d'amphiboles et le minerai exploité dans les mines d'or situées près de formations de fer (typiques du Dakota), alors que cette association est possible, mais pas systématique, pour les mines d'or québécoises. Quant au **contexte géologique des mines de fer québécoises**, il est légèrement différent de celui des mines de fer américaines pour lesquelles des problèmes de santé reliés aux PMA d'amphiboles ont été rapportés. Même si les formations de fer des mines du Minnesota et du Québec se sont produites à la même période et sur la même marge continentale, des différences de métamorphisme entre les deux font que la formation de PMA d'amphiboles est plus probable au Minnesota. Dans les deux cas cependant une association spatiale systématique entre les PMA d'amphiboles et le minerai exploité est attendue. La revue de la littérature sur les sites miniers a confirmé les hypothèses déduites de leurs contextes géologiques : des PMA d'amphiboles de type actinolite ont été rapportées dans six des neuf mines d'or actives, dans trois des dix mines d'or fermées et dans deux des trois mines de fer actives, au Québec.

L'étude minéralogique de onze mines d'or et de deux mines de fer québécoises, actives ou fermées, a révélé la présence de PMA d'amphiboles dans huit d'entre elles. Une morphologie en aiguille a aussi été observée dans sept de ces mines. Contrairement aux mines canadiennes et à celles de Homestake et du Minnesota, où la grunérite est la principale source de PMA d'amphiboles, l'actinolite est la plus présente dans les sites miniers québécois. Il faut toutefois souligner que les échantillons des sites miniers étudiés n'avaient pas nécessairement été prélevés dans des zones exploitées.

En conclusion, la présence de PMA documentée dans certaines mines de fer et d'or québécoises montre qu'une exposition à ces particules est plausible. Il serait donc approprié d'effectuer des études pétrographiques systématiques dans ces mines afin d'identifier les zones susceptibles de contenir des PMA et de procéder à des mesures de fibres dans le cadre du programme d'échantillonnage de l'air. En l'absence de mesures de fibres dans les mines, il est prudent de préconiser des niveaux d'exposition les plus faibles possibles.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	XI
1. INTRODUCTION	1
1.1 Données d'épidémiologie, d'expologie et de toxicologie	1
1.2 Contexte géologique	2
1.2.1 Définitions	3
1.2.2 Métamorphisme	6
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	9
3. MÉTHODOLOGIE	11
3.1 Épidémiologie, expologie et toxicologie	12
3.2 Contextes géologiques et minéralogie	13
3.2.1 Recherche bibliographique	13
3.2.2 Analyse minéralogique	13
4. RÉSULTATS	17
4.1 Épidémiologie	17
4.1.1 Mines d'or	17
4.1.2 Mines de fer incluant les mines de taconite	24
4.2 Expologie/métrologie	32
4.2.1 Données sur les expositions dans les mines d'or	33
4.2.2 Données sur l'exposition dans les mines de fer incluant les mines de taconite	37
4.3 Géologie/minéralogie	45
4.3.1 Revue de la littérature	45
4.3.2 Caractérisation minéralogique	58
4.4 Toxicologie des PMA	67
4.4.1 Toxicité des particules minérales allongées	67
4.4.2 Études in vivo recensées	70
4.4.3 Conclusions concernant les connaissances toxicologiques	71
5. DISCUSSION	73

5.1	Cancers et maladies pulmonaires	73
5.1.1	Travailleurs des mines d'or	73
5.1.2	Travailleurs des mines de fer	73
5.2	Expositions cancérogènes et fibrogènes dans les mines d'or et de fer	74
5.3	Contextes géologiques et exposition aux PMA	75
5.4	Situation des mines d'or et de fer au Québec	76
5.5	Risque potentiel associé aux PMA et aux autres expositions en milieu minier québécois	76
5.6	Remarques méthodologiques	78
5.6.1	Revue de la littérature	78
5.6.2	Analyse minéralogique	79
6.	CONCLUSION	81
7.	RECOMMANDATIONS	83
7.1	Prévention	83
7.2	Programme d'échantillonnage de l'air	83
7.3	Programme de recherche	84
	RÉFÉRENCES	87
	ANNEXE A : GLOSSAIRE	97
A.I	Épidémiologie	97
A.II	Expologie et géologie	98
	ANNEXE B : RÉSULTATS DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES	99
B.I	Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques menées auprès de travailleurs des mines d'or	99
B.II	Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques menées auprès de travailleurs des mines de fer, incluant les mines de taconite	102
	ANNEXE C : RÉSUMÉS DES DONNÉES D'EXPOLOGIE/MÉTROLOGIE	107
C.I	Résultats d'expologie/méetrologie pour les mines d'or	107
C.II	Résultats des données d'expologie/méetrologie pour les mines de fer incluant les mines de taconite	110
	ANNEXE D : RÉSUMÉS DES DONNÉES GÉOLOGIQUES ET MINÉRALOGIQUES	119
D.I	Caractérisation minéralogique des mines d'or québécoises – Analyse minéralogique détaillée	119
D.II	Caractérisation minéralogique des mines d'or canadiennes – Analyse minéralogique détaillée	121
D.III	Caractérisation minéralogique des mines de fer québécoises – Analyse minéralogique détaillée	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Variétés de fibres d'amiante réglementées et leurs homologues non amiantiformes	5
Tableau 2.	Liste des termes équivalents utilisés dans les équations de recherche bibliographique	12
Tableau 3.	Liste des mines de fer et d'or actives au Québec en 2015* et des mines d'or fermées de la collection de carottes de Polytechnique Montréal	14
Tableau 4.	Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques sur les travailleurs des mines d'or.....	24
Tableau 5.	Résumé des résultats des études épidémiologiques sur les travailleurs des mines de fer	32
Tableau 6.	Résumé des résultats des études d'expologie pour les mines d'or	37
Tableau 7.	Résumé des résultats des études d'expologie pour les mines de fer	45
Tableau 8.	Présence de particules minérales allongées dans les mines d'or et de fer : Résultats de la revue bibliographique	55
Tableau 9.	Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines d'or québécoises.....	59
Tableau 10.	Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines d'or canadiennes.	63
Tableau 11.	Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines de fer québécoises.....	65
Tableau 12.	Valeurs limites réglementaires pour les six contaminants ciblés particulièrement dans les mines d'or et de fer	85

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Conditions métamorphiques de formation des divers assemblages minéralogiques, incluant les amphiboles des séries cummingtonite-grunérite et trémolite (ferro) actinolite, dans les formations de fer8
Figure 2.	Résumé de la démarche utilisée. 11
Figure 3.	Chaîne ferrifère du Mesabi.....38
Figure 4.	Distribution des formations de fer d'âge ~1880 Ma sur les marges continentales du craton du Supérieur.....47
Figure 5.	Carte géologique de la région de la mine Homestake49
Figure 6.	Distribution spatiale des assemblages minéralogiques dans la formation de fer selon la distance du contact avec le Complexe de Duluth..... 50
Figure 7.	Carte géologique de l'Abitibi montrant la distribution des gisements d'or51
Figure 8.	Carte des faciès métamorphiques de l'Abitibi.....52
Figure 9.	Localisation et carte géologique simplifiée des mines d'or canadiennes53
Figure 10.	Compilation de la caractérisation minéralogique des mines d'or.60
Figure 11.	Photographies d'actinolite prismatique de la mine d'or québécoise K.61
Figure 12.	Photographies d'actinolite aciculaire et en aiguille de la mine d'or québécoise L.62
Figure 13.	Photographies de grunérite de la mine canadienne J.....64
Figure 14.	Photographies d'actinolite prismatique de la mine de fer québécoise A.66

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACGIH® :	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
Act ¹ :	Actinolite
Aig :	Aiguille
Amp:	Amphibole
ANSES:	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (France)
Ath :	Anthophyllite
ATSDR :	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
Bq:	Becquerel
CAS :	Chemical Abstracts Service
CCSN :	Commission canadienne de sûreté nucléaire
Cum:	Cummingtonite
D :	Diamètre de la fibre
EPA :	Environmental Protection Agency
EDS	Analyse dispersive en énergie (<i>energy dispersive X-ray spectrometry</i>)
GES :	Groupe d'exposition similaire
Gru:	Grunérite
HAP :	Hydrocarbure aromatique polycyclique
Hbl:	Hornblende
L :	Longueur de la fibre
L/D :	Rapport longueur/diamètre de la fibre
LD :	Limite de détection
Ma :	Million d'années
MEB	Microscopie électronique à balayage

¹ Les abréviations des minéraux proviennent de Whitney et Evans, 2010

MET :	Microscopie électronique à transmission
MOCP :	Microscopie optique à contraste de phase
MSHA :	Mine Safety and Health Administration
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
OMS :	Organisation mondiale de la santé
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration
PEL :	<i>Permissible exposure limit</i> (OSHA)
PMA :	Particule minérale allongée
Qtz :	Quartz
REL :	<i>Recommended exposure limit</i> (NIOSH)
RIS :	Rapport d'incidence standardisé
RMS :	Rapport de mortalité standardisé
RSSM :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines (Chapitre S-2.1, r. 14)
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail (Chapitre S-2.1, r. 13)
TLV [®] :	<i>Threshold limit value</i>
Tr:	Trémolite
Tur :	Tourmaline
USGS :	United States Geological Survey
VEMS :	Volume expiratoire maximal seconde
WL :	Niveau opérationnel de produits de filiation du radon (130 000 mégaélectronvolts d'énergie alpha en décroissance par litre d'air (<i>Working level</i>))
WLM :	<i>Working level month</i>

1. INTRODUCTION

La première mine d'or québécoise a vu le jour en Abitibi-Témiscamingue en 1922². La production minière d'or a connu depuis des hauts et des bas en fonction des ralentissements cycliques de la demande et des prix³. Récemment, après une décennie durant laquelle la production d'or a diminué en raison de la fermeture de certaines mines dont les réserves s'épuisaient, la tendance s'est inversée vers 2011 et la production d'or est en hausse au Québec, atteignant 50 636 kg en 2016. En 2013, environ 4 000 personnes travaillaient dans les mines d'or situées dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du Nord-du-Québec⁴.

Débutée au XVIII^e siècle, l'exploitation du minerai de fer a pris un essor important après la Deuxième Guerre mondiale². L'augmentation du prix du fer au cours de la dernière décennie, notamment à la suite de la demande accrue des pays émergents, a stimulé les efforts d'exploration, de mise en valeur et d'exploitation au Québec (Blackburn et Raymond, 2010). Le prix moyen de la tonne de concentré de fer a subi des fluctuations importantes, passant de 16 \$ US en 2001, à un sommet de 170 \$ US en 2011⁵. Cependant, la mise en exploitation de nouvelles mines à fort tonnage a créé un déséquilibre entre l'offre et la demande, causant un surplus sur le marché, ce qui, combiné à un ralentissement de la croissance de la demande chinoise, a provoqué une chute du prix du fer qui atteignait moins de 60 \$ US la tonne en mars 2015⁵.

Selon Ressources naturelles Canada, le secteur de l'extraction de minerais d'or et d'argent employait 2 893 travailleurs (2 651 hommes; 242 femmes) et celui de l'extraction du minerai de fer employait 3 141 salariés (2 831 hommes; 310 femmes) au Québec, en 2011⁶.

La politique québécoise d'accélération du développement minéral du Nord québécois prévoyait une augmentation des activités d'exploration et d'exploitation ainsi que du nombre de travailleurs (Secrétariat au Plan Nord, 2015). En décembre 2015, la province comptait trois mines actives de fer ou de fer et titane, ainsi que onze mines actives d'or, ou d'or, d'argent, de cuivre et de zinc (ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016). Des projets miniers de mise en valeur et de développement étaient également identifiés, dont au moins sept projets de mines d'or en 2015⁷.

1.1 Données d'épidémiologie, d'expologie et de toxicologie

Les premiers écrits concernant les maladies professionnelles des mineurs datent du 16^e siècle : Agricola, un médecin allemand, a notamment décrit les principales maladies des mineurs dans son livre *De Re Metallica*. Il y parle notamment des cancers, de l'asthme et de difficultés à

² De l'or tiré d'alluvions était exploité au 19^e siècle en Beauce, mais les premières exploitations minières ont débuté en Abitibi-Témiscamingue (<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/industrie-histoire.jsp>)

³ <http://www.encyclopediecanadienne.ca/fr/article/exploitation-miniere/>

⁴ <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/mines/mines-en-chiffres-2013a.pdf>

⁵ [Le fer n'étant pas coté en bourse, ces chiffres proviennent d'estimations, à partir du coût du minerai de fer chinois au port de Tianjin.](http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-fer.jsp)

<http://mern.gouv.qc.ca/mines/statistiques/substance/substance-fer.jsp>

⁶ Ressources naturelles Canada, *Revue générale sur les industries minérales – Mines, carrières et sablières 2011 Recensement annuel des mines – Tableau 10*, no 26-201-X au catalogue. Disponible à : <http://sead.nrcan.gc.ca/26Series/2011/2011-26-series-Table10-fra.aspx>

⁷ <http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/publications/2015/publication-2015-chapitre5.pdf>

respirer qui s'apparentent à la bronchite chronique et qu'il a associés aux poussières et aux gaz dans les mines (Weber, 2002).

Les maladies professionnelles rapportées chez les travailleurs des mines métalliques touchent principalement le système respiratoire et relèvent de deux grands types : les fibroses pulmonaires, essentiellement associées à l'exposition à l'amiante et à la silice cristalline, et les cancers pulmonaires, notamment en lien avec les concentrations de silice dans la poussière des mines (Lightfoot, Pacey et Darling, 2010). Des maladies touchant d'autres systèmes sont généralement celles rapportées chez les travailleurs des mines exposés à la silice cristalline : maladies chroniques rénales (Steenland, 2005) et cardiaques (hypertensives et ischémiques) (Liu *et al.*, 2014) et maladies auto-immunes tels la sclérodermie, l'arthrite rhumatoïde et le lupus érythémateux systémique (Parks, Conrad et Cooper, 1999). Il faut souligner que le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) considère que les fibres d'amiante sont associées aux cancers du larynx et de l'ovaire (avec preuves suffisantes chez l'humain) et aux cancers du pharynx, de l'estomac et de la région colorectale (avec preuves limitées chez l'humain) (International Agency for Research on Cancer, 2012a).

Des évaluations d'exposition menées dans quelques mines d'or et de fer américaines ont établi la présence potentielle de fibres d'amiante et d'autres particules minérales allongées (PMA)⁸ dans les poussières aéroportées, soulignant des lacunes dans les données d'exposition disponibles (Gamble et Gibbs, 2008). Le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), aux États-Unis, a recommandé de revoir les données recueillies auprès des travailleurs de ces mines en portant une attention particulière aux agents fibrogènes et cancérigènes, dont les PMA amiantiformes et non amiantiformes, jugeant que l'association entre le risque de cancer pulmonaire et l'exposition n'était pas concluante dans les études publiées (National Institute for Occupational Safety and Health, 2011).

Les mécanismes physiopathologiques et moléculaires qui participent au développement de tumeurs à la suite d'une exposition aux fibres d'amiante ne sont pas encore totalement établis. Toutefois, des preuves expérimentales suggèrent que certaines caractéristiques morphologiques de même que la biopersistance et le potentiel des fibres d'amiante à générer des radicaux libres et des espèces réactives de l'oxygène ou de l'azote seraient mis en cause dans le processus de cancérogenèse (IARC, 2012a). Puisque plusieurs PMA dans les mines présentent ces mêmes caractéristiques, il est justifié de s'interroger sur la toxicité et la cancérogénicité de ces substances (NIOSH, 2011).

1.2 Contexte géologique

Dans la phase préparatoire de la présente étude, aucune information sur la présence ou l'absence de PMA, d'amiante ou d'autres fibrogènes et cancérigènes dans les poussières de mines québécoises n'a été trouvée. Cependant, les contextes géologiques des mines et gisements de fer et d'or du Québec semblent favorables à la formation de PMA et à la présence d'amphiboles faisant partie de la classification de l'amiante. En effet, la plupart des mines et gisements d'or sont localisés dans des ceintures de roches vertes archéennes contenant des roches mafiques (riches en fer et magnésium) ayant atteint des conditions de pression et de température propices à la formation de PMA d'amphiboles de la série actinolite-trémolite lors du métamorphisme régional (Powell, W. G., Carmichael et Hodgson, 1993). En ce qui a trait aux

⁸ Particule minérale ayant un rapport longueur:diamètre supérieur à 3:1 (voir plus de détails à la section 1.2)

mines de fer, la plupart des mines et projets miniers québécois sont associés aux formations de fer de la Fosse du Labrador qui s'étend sur un axe nord-sud de Kuujuaq à Fermont. Puisque les formations de fer à l'extrême nord et à l'extrême sud de la Fosse ont subi un métamorphisme moyen, il est fort probable qu'on y trouve les amphiboles de la série cummingtonite-grunérite (Clark, 1994).

Afin de mieux comprendre les problématiques spécifiques à la santé et à la sécurité des travailleurs œuvrant dans les mines d'or et de fer dans le monde et au Québec, il est important de s'entendre sur la définition de certains termes utilisés différemment en santé au travail et en géologie, et de comprendre le concept de métamorphisme.

1.2.1 Définitions

Particule minérale allongée (PMA)

L'abréviation PMA s'applique à toute particule minérale ayant un rapport longueur/diamètre supérieur à 3 (NIOSH, 2011). Elle peut être employée sans distinction de la morphologie amiantiforme ou non amiantiforme des minéraux.

Les PMA présentant un intérêt sanitaire proviennent essentiellement de trois grandes espèces minéralogiques : les amphiboles, les zéolites et les serpentines (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2017). Étant donné le contexte géologique des mines et gisements de fer et d'or québécois, il est peu probable d'y rencontrer des PMA de serpentines ou de zéolites et la suite du rapport ne portera que sur les PMA d'amphiboles. Pour ne pas alourdir le texte, l'abréviation PMA d'amphiboles est utilisée dans ce qui suit pour désigner les types d'amphiboles pouvant avoir une morphologie amiantiforme puisque presque toutes les variétés d'amphiboles correspondent à la définition de PMA, y compris les cristaux centimétriques.

Fibre

Ce terme recouvre toutes les particules minérales allongées (PMA), aussi bien les amiantiformes que les non amiantiformes (dont les fragments de clivage), ainsi que les particules non minérales allongées qui répondent aux critères dimensionnels de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Fibre courte

Il existe plusieurs critères dimensionnels définissant les fibres courtes. Dans ce rapport, la définition proposée par l'AFSSET a été adoptée : il s'agit de toute particule minérale allongée (PMA) d'une longueur (L) inférieure à 5 µm, un diamètre (d) inférieur à 3 µm et un rapport longueur/diamètre (L/D) supérieur à 3 (Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, 2009).

Fibre fine

Dans ce rapport, la définition d'une fibre fine proposée par l'AFSSET a été adoptée : il s'agit de toute particule minérale allongée (PMA) d'une longueur (L) supérieure à 5 µm, un diamètre (d) inférieur à 0,2 µm et un rapport longueur/diamètre (L/D) supérieur à 3 (AFSSET, 2009).

Fibre OMS

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a défini une fibre « comptable » comme étant une particule dont les caractéristiques correspondent à une longueur (L) $> 5 \mu\text{m}$, un diamètre (D) $< 3 \mu\text{m}$ et un rapport longueur/diamètre (L/D) > 3 . Ces dimensions sont déterminées par microscopie optique à contraste de phase (Organisation mondiale de la santé, 1998).

Fragments de clivage

Les fragments de clivage peuvent être formés lorsque des minéraux de type amphibole non fibreux (non amiantiformes) sont broyés. Au sein d'une population de fragments de clivage d'amphiboles non amiantiformes, une fraction de particules peut correspondre à la définition d'une fibre comme adoptée dans différentes réglementations. Les distributions dimensionnelles de fibres d'amiante peuvent être différenciées de celles des fragments de clivage, mais il peut s'avérer difficile, en présence d'une seule particule, de distinguer s'il s'agit d'un fragment de clivage ou d'une fibre d'amiante (Agency for Toxic Substances & Disease Registry, 2001; Meeker *et al.*, 2003).

Les fragments de clivage peuvent avoir la même composition chimique que les fibres correspondantes d'amiante sans en avoir toutes les caractéristiques dimensionnelles (longueur, diamètre et rapport longueur/diamètre), de propriétés chimiques et physiques, de performances mécaniques. Certains fragments de clivage sont aciculaires et le clivage en escalier sur les côtés de certaines particules est commun (Srebro et Roggli, 1994).

De façon générale, les variétés amiantiformes d'amiante sont caractérisées par des fibres longues et fines tandis que les fragments de clivage des variétés non amiantiformes correspondantes sont constitués des fibres courtes dont le diamètre est plus large. Une distinction claire entre les fragments de clivage et les fibres d'amiante serait que la largeur des fragments de clivage est fonction de la longueur, tandis que la largeur des fibres d'amiante est relativement constante, peu importe la longueur (Siegrist et Wylie, 1980).

Amiante

L'amiante est un terme qui décrit six minéraux naturels, des silicates hydratés, répartis en deux groupes : la serpentine et les amphiboles. Sa valeur commerciale lui est conférée par différentes propriétés : faible conductivité électrique et thermique, bonne stabilité chimique, durabilité, haute résistance à la traction, flexibilité, etc.

La terminologie « amiante » n'est pas utilisée de façon uniforme par les minéralogistes, les hygiénistes et les médecins du travail, les épidémiologistes, les chimistes ou analystes, et les organismes réglementaires (Case, Abraham, Meeker, Pooley et Pinkerton, 2011; Lowers et Meeker, 2002). Plusieurs silicates peuvent se présenter sous deux formes : amiantiforme et non amiantiforme. Le tableau 1 comporte la liste des six minerais dont la variété fibreuse (amiantiforme) est réglementée sous le terme « amiante », ainsi que leurs équivalents non fibreux (non amiantiformes), qui ne sont pas réglementés comme de l'amiante. Une certaine confusion associée à la terminologie « amiante » est entretenue par les difficultés d'identification des différentes morphologies des fibres, tant amiantiformes que non amiantiformes.

Tableau 1. Variétés de fibres d'amiante réglementées et leurs homologues non amiantiformes

Variété amiantiforme (N° CAS) ¹	Composition chimique	Variété non amiantiforme (N° CAS) ¹
Serpentine		
Chrysotile (12001-29-5)	3MgO.2SiO ₂ .2H ₂ O	Antigorite (12135-86-3) Lizardite (12161-84-1)
Amphiboles		
Amiante actinolite (77536-66-4)	2CaO.4MgO.FeO.8SiO ₂ .H ₂ O	Actinolite (13768-00-8)
Amiante anthophyllite (77536-67-5)	7MgO. 8SiO ₂ .H ₂ O	Anthophyllite (17068-78-9) Cummingtonite (17499-08-0)
Amiante trémolite (77536-68-6)	2CaO.5MgO.FeO.8SiO ₂ .H ₂ O	Trémolite (14567-73-8)
Amosite (12172-73-5)	11FeO.3MgO.8SiO ₂ .H ₂ O	Grunérite (14567-61-4)
Crocidolite (12001-28-4)	Na ₂ O.Fe ₂ O ₃ .FeO.8SiO ₂ .H ₂ O	Riébeckite (17787-87-0)

D'après (Streib, 1978)

¹ : N° de registre Chemical Abstracts Service (CAS)

Dans le groupe des amphiboles, les formes amiantiformes et non amiantiformes de la trémolite, de l'actinolite et de l'anthophyllite ne portent pas un nom différent; c'est la raison pour laquelle, dans différents textes réglementaires, le terme amiante ou amiantiforme est ajouté au nom du minéral. Le minéral amiantiforme et son homologue non amiantiforme ont la même composition chimique, mais ils diffèrent par leur croissance cristalline.

Amiantiforme

Le terme amiantiforme fait référence à une morphologie provenant d'une cristallisation naturelle et unidimensionnelle d'un minéral donnant lieu à des fibres longues et filiformes ayant l'apparence de cheveux. Ces fibres sont rassemblées dans des agglomérats pouvant facilement se séparer en plus petites fibres (fibrilles), de diamètre souvent inférieur à 0,5 µm, qui conservent leurs propriétés de surface et d'activité lors des différents procédés de transformation. Cette particularité est à la base de la terminologie « polyfilamenteux » qui correspond à la caractéristique la plus importante de l'amiante (MSHA, 2005). Cette morphologie confère au minéral des caractéristiques particulières, dont un rapport longueur/diamètre élevé, des propriétés mécaniques accrues (force, flexibilité et durabilité). Quand une pression est appliquée sur une fibre d'amiante, elle plie plutôt que se brise. Même si le terme amiantiforme n'a pas été défini pour des besoins réglementaires, l'Environmental Protection Agency (EPA) américaine l'utilise pour différencier les minéraux amiantiformes des fragments de clivage (EPA, 1993).

En microscopie optique, la morphologie amiantiforme dans les échantillons en vrac est généralement reconnue par les caractéristiques suivantes :

- rapport longueur/diamètre de 20 à 100 et plus encore pour des fibres de longueur supérieure à 5 µm (les rapports L/D doivent être déterminés pour les fibres et non pour leurs faisceaux);
- fibrilles très fines (diamètre inférieur à 5 µm);
- et au moins deux caractéristiques parmi les suivantes :
 - fibres parallèles regroupées en faisceaux;
 - faisceaux de fibres avec des extrémités effilochées;
 - agglomérats de fibres individuelles enchevêtrées;
 - fibres incurvées.

Aciculaire

Il s'agit de la morphologie d'un minéral qui a une forme allongée. Ce terme est utilisé ici pour désigner les minéraux allongés plus gros que les « aiguilles » qui sont définies ci-dessous.

Aiguille

Ce terme ne fait pas partie de la terminologie usuelle liée à l'amiante, mais est introduit pour faciliter les descriptions minéralogiques. Il est ici utilisé pour désigner des minéraux ayant un rapport L/D supérieur à 5 et un diamètre inférieur à 30 µm.

Non amiantiforme

La plupart des variétés minérales non amiantiformes, présentées au tableau 1, ont peu ou pas de signification commerciale. Elles sont moins solides et moins résistantes. Ces variétés, qui ont la même formule chimique que leurs correspondants amiantiformes, ne se développent pas de façon unidimensionnelle en longues fibres, mais plutôt de façon bi ou tridimensionnelle, donnant lieu à une morphologie plus massive. Lorsqu'une pression est appliquée, les minéraux non amiantiformes se fracturent facilement en des particules prismatiques, les fragments de clivage. Les particules ayant cette morphologie peuvent toutefois correspondre à la définition de fibres respirables donnée par l'OMS lorsqu'elles sont observées au microscope (NIOSH, 2011).

1.2.2 Métamorphisme

Dérivant des lois de la thermodynamique, le métamorphisme désigne l'ensemble des transformations subies par une roche sous l'effet de l'augmentation des conditions de pression et de température à l'intérieur de la croûte terrestre (Foucault, Raoult, Cecca et Platevoet, 2014). Cette augmentation se produit lorsque des roches sont enfouies à des profondeurs pouvant atteindre 50 km lors des collisions continentales, comme celle se poursuivant toujours entre l'Inde et l'Asie, qui sont à l'origine de la formation de l'Himalaya. Une augmentation de température se produit également dans l'auréole de magma se solidifiant sous la surface pour former des masses rocheuses appelées pluton. L'assemblage de minéraux produits lors du métamorphisme dépend des conditions de pression-température, mais aussi de la composition initiale de la roche. Ainsi, un grès, composé de grains de quartz (SiO₂), deviendra un quartzite

qui est toujours composé de quartz, mais dont la texture est granulaire. Par contre, les métapélites (roches métamorphiques issues de la boue accumulée au fond des lacs et des océans) contiennent plusieurs éléments chimiques et leur métamorphisme formera divers minéraux. On passera ainsi de la boue au shale à bas degré de métamorphisme, ensuite il se formera de la biotite et du grenat à degré moyen, puis du staurotide et de la kyanite, et enfin de la sillimanite (figure 1). Comme indiqué à la figure 1, la formation d'amphiboles requiert la présence de fer et de magnésium et, dépendamment du minéral, de calcium et de sodium.

Les mines d'or québécoises sont localisées dans des ceintures de roches vertes qui contiennent des roches volcaniques mafiques, riches en fer et en magnésium. Dans ce type de roche, ce sont les amphiboles de la solution solide⁹ trémolite-actinolite qui peuvent se former à des degrés de métamorphisme faibles à moyens, que l'on nomme schiste vert dans les roches mafiques (Powell, W.G. *et al.*, 1993).

Les mines de fer du Minnesota et du Québec, de même que la mine d'or Homestake du Dakota se trouvent toutes dans des formations de fer rubanées (*banded iron formation* ou BIF). La figure 1 présente l'évolution minéralogique attendue de ces roches lors d'une augmentation de température causée par le métamorphisme. On s'attend donc à trouver les amphiboles de la solution solide cummingtonite et grunérite à des degrés métamorphiques moyens, alors que celles de la solution solide trémolite-actinolite devraient se former à un degré moyen-élevé. Il est à noter qu'aucune amphibole n'est stable à un degré de métamorphisme élevé.

Bien que la présence de PMA soit probable dans les mines et projets miniers du Québec, il est impossible de l'affirmer sans avoir préalablement effectué des études spécifiques, puisque la géologie de chaque gisement métallifère est unique. Dans les gisements d'or, par exemple, les PMA potentielles se trouvent dans une roche associée au contexte géologique favorable à la minéralisation en or, mais le minerai n'est pas nécessairement associé à ce type de roche. En ce qui a trait aux mines de fer, les PMA sont le produit direct d'un métamorphisme moyen des formations de fer. Par contre, la formation d'amphiboles de la série cummingtonite-grunérite est un processus complexe qui dépend de la température, de la pression, de la fugacité d'oxygène et de la composition de la roche (Klein, 2005).

⁹ Une solution solide est un cristal homogène de composition et de propriétés intermédiaires entre plusieurs constituants purs (Foucault *et al.*, 2014).

		Degré de métamorphisme			
		Faible	Moyen		Fort
Diagénétique		Zone de biotite	Zone de grenat	Zone de staurolite-kyanite et de kyanite	Zone de sillimanite
	Précoce				
	chaille → quartz				
	"Fe ₃ O ₄ •H ₂ O" → magnétite				
	"Fe(OH ₃)" → hématite				
	greenalite				
	stilpnomélane				
	ferri-annite				
	talc-minnesotaite				
	Fe-chlorite (ripidolite)				
	dolomite-ankérite				
	calcite				
	sidérite-magnésite				
	riébeckite				
	cummingtonite-grunérite (anthophyllite)				
	trémolite-ferroactinolite (hornblende)				
	almandine				
	orthopyroxène				
	clinopyroxène				
	fayalite				

Figure 1. Conditions métamorphiques de formation des divers assemblages minéralogiques, incluant les amphiboles des séries cummingtonite-grunérite et trémolite (ferro) actinolite, dans les formations de fer (adapté de Klein, 2005, figure 10).

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'état des connaissances sur la présence des PMA dans les mines d'or et de fer du Québec ainsi que de déterminer leur contribution potentielle dans l'étiologie des cancers et des maladies pulmonaires. Pour ce faire, les objectifs spécifiques suivants sont poursuivis :

1. Dresser le bilan des études épidémiologiques mondiales sur les cancers et les maladies pulmonaires chez les travailleurs des mines d'or et de fer;
2. Réaliser le bilan des connaissances sur la toxicité des poussières de ces mines, en particulier des PMA amiantiformes et non amiantiformes;
3. Décrire la géologie des mines de fer et d'or mondiales qui ont fait l'objet d'études sanitaires et la comparer à celle des mines d'or et de fer québécoises.

3. MÉTHODOLOGIE

Une grande partie des travaux entrepris pour répondre aux objectifs de cette étude consiste en des revues de la littérature; l'ensemble de la démarche est illustrée à la figure 2. D'abord, une analyse des articles de la littérature internationale portant sur les agents fibrogènes et cancérogènes (et leurs niveaux d'exposition) dans les mines d'or et de fer a été réalisée. À partir des études épidémiologiques menées dans des mines d'or et de fer, certains pays et régions où des cancers et des maladies pulmonaires d'origine professionnelle ont été rapportés chez des travailleurs ont été identifiés. En parallèle, les études d'exposition des travailleurs de ces mines de fer et d'or ont été revues pour en faire ressortir les caractéristiques des différents agents fibrogènes et cancérogènes mis en cause. De plus, une analyse des études toxicologiques portant principalement sur les PMA répertoriées dans ces mines a permis de déterminer différents paramètres de toxicité de ces particules. Une autre revue de la littérature a ensuite documenté les différents contextes géologiques des mines d'or et de fer des pays et régions identifiés dans les études épidémiologiques et, pour compléter l'état des connaissances, une dernière revue de la littérature a exploré la présence de PMA d'amphiboles dans les mines d'or et de fer du Québec.

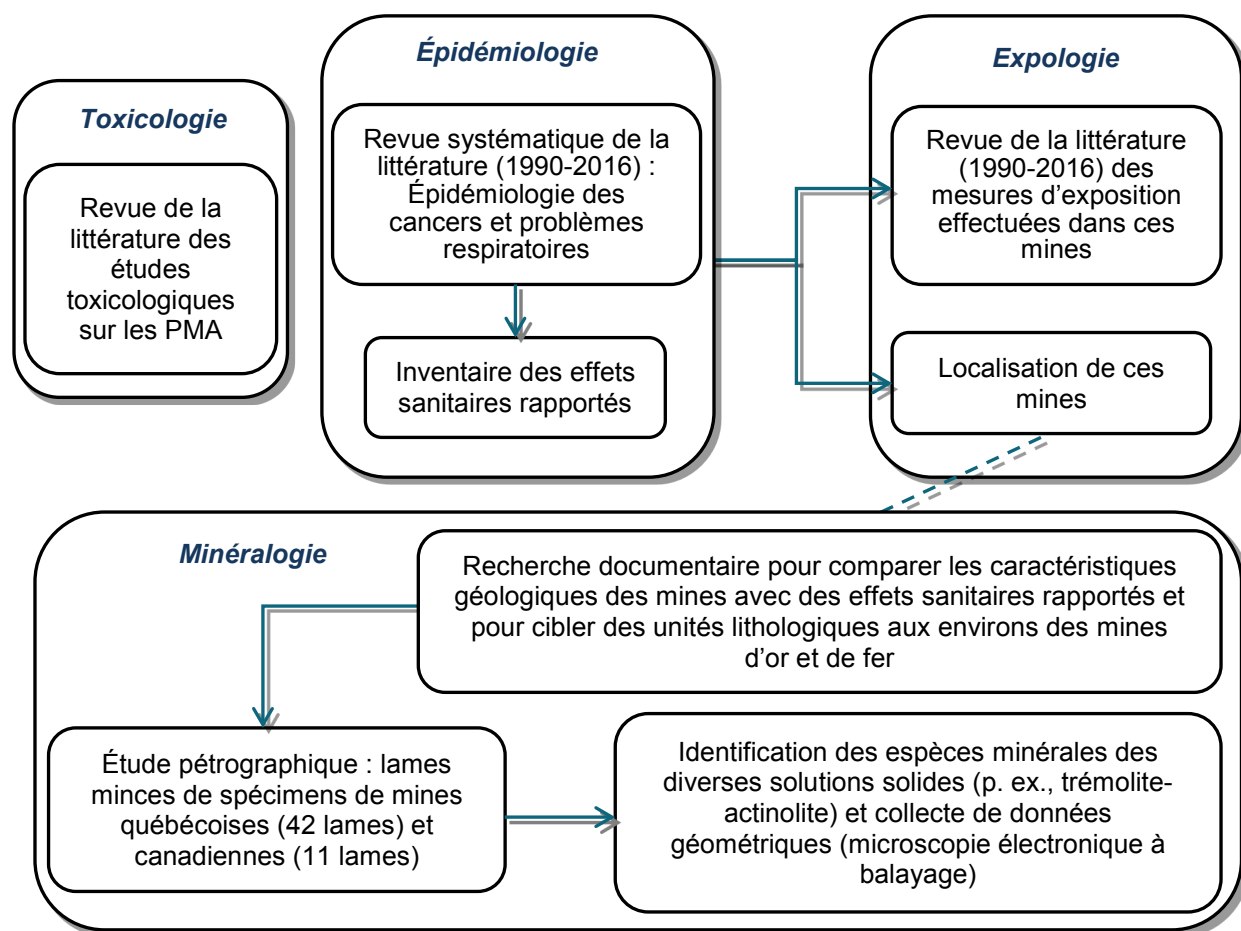


Figure 2. Résumé de la démarche utilisée.

Les informations recueillies par les revues de littérature ont été complétées par la caractérisation minéralogique d'échantillons provenant des mines d'or et de fer québécoises pour déterminer si ces mines sont susceptibles de contenir des PMA d'amphiboles et pour caractériser sommairement leur morphologie.

Les diverses approches utilisées dans le cadre de cette étude comportent un vocabulaire spécialisé pour lequel un glossaire peut être consulté à l'annexe A.

3.1 Épidémiologie, expologie et toxicologie

La revue de la littérature scientifique internationale publiée entre janvier 1990 et juin 2016 a été effectuée en interrogeant les bases de données documentaires Pubmed, Embase, Toxline, BIOSIS, Analytical Abstracts, CAB ABSTRACTS, Current Contents Search, CCHST (incluant CANADIANA et OSHLINE), CSST(ISST), OHS Update (incluant CISDOC du Bureau international du Travail, NIOSHTIC et HSELINE) et ProQuest Dissertations and Theses Professional. Diverses combinaisons de mots-clés ont été utilisées, selon les grandes catégories suivantes : mines (fer/taconite et or), exposition (minéraux fibreux et autres substances), épidémiologie et toxicologie (tableau 2). La recherche bibliographique a finalement été complétée à l'aide de références tirées des articles et rapports consultés. Des publications précédant l'année 1990 ont été ainsi considérées en fonction de leur pertinence.

Tableau 2. Liste des termes équivalents utilisés dans les équations de recherche bibliographique

Catégorie	Terme équivalent recherché (français et anglais)				
Exposition	Amiante	Amphibole	Amosite	Anthophyllite	Actinolite
	Trémolite	Cummingtonite/ grunérite	Riébeckite	Silice cristalline/quartz	Arsenic/ arsénopyrite
	Radon	Échantillonnage	Caractérisation	Minéralogie	Particules minérales allongées (PMA)
	Fragments de clivage	Fibres minérales			
Mine	Or	Fer/taconite	Mineurs	Minerais	
Toxicologie et épidémiologie	Biopersistance	Cancer/ néoplasme/ tumeur	Pneumoconiose/ Amiantose/ Silicose	Cancérogénèse	Effets sanitaires
	Épidemiolog*	Incidence/ prévalence	Mortalité	Risque	Facteurs de risque
	Maladies pulmonaires	Mésothéliome			

* préfixe

La recension des écrits de langues française et anglaise a été faite parmi les articles, les publications ou rapports d'organismes reconnus et les thèses révisés par des pairs. En fonction des objectifs de la présente étude, les critères de sélection suivants ont été appliqués aux articles retenus : exposition (simple ou mixte) ou caractérisation géologique, présence de PMA et mise en évidence d'autres cancérogènes ou fibrogènes, de cancers et de maladies

pulmonaires chez les travailleurs des mines d'or et de fer. Alors que la recension des écrits en épidémiologie et en expologie visait l'identification exhaustive des publications scientifiques, la recension des écrits toxicologiques visait à faire ressortir les concepts-clés et les lacunes en matière de connaissances.

3.2 Contextes géologiques et minéralogie

3.2.1 Recherche bibliographique

La recherche bibliographique a été effectuée à partir de livres de référence sur le sujet, des bases de données bibliographiques GEOREF (de l'American Geosciences Institute, la plus utilisée en sciences de la terre), ProQuest Dissertations and Theses Professional et Google Scholar, des sites gouvernementaux des endroits concernés et du site Internet MINDAT qui recense les minéraux à travers le monde.

À l'aide de ces sources, les rapports scientifiques et les articles géologiques traitant de mines d'or et de fer du Québec retracés ont été étudiés pour en faire ressortir toute mention des noms des différentes variétés de PMA d'amphiboles.

3.2.2 Analyse minéralogique

Cette analyse a été effectuée sur des échantillons provenant de deux types de sources : des mines québécoises et canadiennes actives en 2015 (ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, 2016) et d'une collection de carottes de Polytechnique Montréal. Les mines pour lesquelles la revue de la littérature a révélé la présence de PMA d'amphiboles ont été contactées afin d'obtenir des échantillons. Des échantillons de deux autres mines canadiennes ont été acquis à des fins de comparaison puisque leur contexte géologique est similaire à celui d'une mine d'or américaine où des maladies liées aux PMA d'amphiboles ont été étudiées. Afin de compléter cette analyse minéralogique, les échantillons de la collection de Polytechnique Montréal qui proviennent de mines d'or et de fer du Québec, pour la plupart fermées, mais situées dans les mêmes régions que les mines actives, ont été caractérisés.

Au moment d'effectuer l'analyse minéralogique (octobre 2015), le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec indiquait qu'il y avait neuf mines d'or et trois mines de fer en activité (le nom de ces mines apparaît au tableau 3). La collection d'échantillons de roches de Polytechnique Montréal provient de 7 mines d'or (toutes fermées en 2015) et d'une mine de fer (active en 2015). La collection de Polytechnique Montréal est composée de 212 échantillons individuels de roches et de près de 270 mètres de carottes géologiques.

3.2.2.1 Analyse macroscopique

Tous les échantillons individuels ont fait l'objet d'une analyse macroscopique en étudiant au minimum un échantillon par lithologie. Pour les boîtes de carottes, un échantillon a été sélectionné systématiquement à chaque changement de lithologie et lorsque le pourcentage de l'assemblage minéralogique d'une même lithologie semblait comporter de légères modifications.

L'analyse pétrographique macroscopique a comporté six étapes :

1. Inspection visuelle de l'ensemble de la collection de Polytechnique afin de distinguer les différentes lithologies et la présence potentielle de PMA;
2. Observation et description des échantillons à l'aide d'un microscope binoculaire (grossissement de 4,5X) et d'une loupe grossissante (10X);
3. Analyse des échantillons sélectionnés à l'aide de tests géologiques classiques (test de rayage avec un clou, test d'identification de carbonate de calcium avec de l'acide chlorhydrique 10 %, tests de magnétisme avec des aimants);
4. Rédaction d'une fiche minéralogique identifiant les différents minéraux perceptibles à la suite des étapes précédentes;
5. Sélection des échantillons contenant des PMA ou susceptibles d'en contenir.

Tableau 3. Liste des mines de fer et d'or actives au Québec en 2015* et des mines d'or fermées de la collection de carottes de Polytechnique Montréal

Mine active 2015	Collection Polytechnique
Beorfor (Or)	Sullivan (Or)
Canadian Malartic (Or)	Matagami (Or)
Casa Berardi (Or)	Lac Dufort (Or)
Éléonore (Or)	Lamaque (Or)
Goldex (Or)	Opémiska (Or)
Lac Bachelor (Or)	Manitou (Or)
Lapa (Or)	Camflo (Or)
LaRonde (Or)	
Westwood (Or)	
Fire Lake (Fer)	
Mont-Wright (Fer)	
Lac Tio (Fer)	

* D'après la liste des mines actives en 2015 sur le site du ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (<https://mern.gouv.qc.ca/mines/publications/cartes-minieres/>)

3.2.2.2 Analyse microscopique

Les échantillons de la collection de Polytechnique Montréal et ceux obtenus des mines ont été acheminés au laboratoire de la compagnie Vancouver Petrographics Ltd pour en faire des lames minces dans le but d'en réaliser une analyse microscopique. Cette analyse s'est déroulée en trois étapes de microscopie optique et électronique.

Les lames minces ont d'abord été étudiées à l'aide d'un microscope optique polarisant Zeiss Axio Scope A1 de recherche au laboratoire de microscopie de Polytechnique Montréal. Ce microscope permet d'observer les lames en lumière transmise et polarisée à des grossissements de 1X, 5X, 10X et 50X. Les tests usuels d'identification minéralogique (réfringence, pléochroïsme, clivage, forme, biréfringence, angle d'extinction, allongement) ont été effectués sur tous les minéraux susceptibles de contenir des PMA d'amphiboles.

Certaines lames minces ont été sélectionnées pour une caractérisation minéralogique additionnelle à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'un spectromètre rayons X pour analyse dispersive en énergie (EDS) (JEOL JSM840) au Centre de caractérisation microscopique des matériaux (CM)² de Polytechnique Montréal. Cette méthode de spectrométrie a été utilisée parce qu'elle permet de déterminer rapidement et qualitativement la composition chimique d'un minéral. Cette investigation avait pour but de confirmer si les minéraux soupçonnés de contenir des PMA d'amphiboles lors de la caractérisation par microscopie optique en comportaient vraiment, de préciser le type d'amphibole, et de mesurer les axes longs et courts des minéraux, afin de les caractériser sommairement (et non pas systématiquement).

À la suite de la caractérisation par microscopie électronique, toutes les lames minces ont été réexaminées par microscopie optique pour confirmer ou modifier les conclusions initiales en se basant sur les informations acquises par MEB.

4. RÉSULTATS

4.1 Épidémiologie

Les travailleurs des mines d'or et de fer sont exposés à la silice cristalline, à plusieurs métaux, au radon, aux émissions de moteurs diesels, de même qu'à des fibres. À l'exception des PMA d'amiante ou contenant de l'amiante (dont l'association exposition-réponse a été démontrée pour plusieurs maladies et dans plusieurs contextes d'activité économique), l'exposition aux PMA d'amphiboles non amiantiformes n'a été associée à aucune maladie dans les études épidémiologiques ajustant pour les facteurs de risque connus de ces maladies (NIOSH, 2011; Nelson, A. R. *et al.*, 2009). Mais comme ces particules présentent des analogies structurales et chimiques avec celles des fibres d'amiante, l'accent a été mis ici sur les maladies ou signes associés aux fibres d'amiante, soit la fibrose pulmonaire (amiantose), la présence de plaques pleurales et les cancers pour lesquels il existe, chez l'humain, des preuves suffisantes (poumons, mésothélium, larynx) ou limitées (pharynx, estomac et côlon-rectum). Les autres maladies pulmonaires et les cancers associés aux divers contaminants détectés dans les mines d'or et de fer ont aussi été revus et mentionnés.

4.1.1 Mines d'or

En 2015, neuf pays ont produit chacun plus de 100 tonnes métriques d'or, c'est-à-dire 63,2 % de la production mondiale (U.S. Geological Survey, 2016). Cependant, depuis 1990, seuls les mineurs d'or de cinq de ces pays, et ceux de la France ont fait l'objet d'études épidémiologiques portant sur le cancer et les maladies respiratoires. Les résultats de ces études sont résumés au tableau 4 et présentés plus en détail à l'annexe B.I. Ces études ont particulièrement abordé l'exposition aux poussières totales et respirables, à la silice cristalline, au radon et à l'arsenic. Dans seulement deux de ces études, une attention particulière a été portée aux fibres minérales non amiantiformes, aux États-Unis (Steenland et Brown, 1995a) et en Ontario (Kusiak, Ritchie, Springer et Muller, 1993). Deux études provenant d'autres pays ont évoqué l'intoxication au mercure chez les mineurs d'or, sans en reconnaître les symptômes d'intoxication (Drasch, Bose-O'Reilly, Beinhoff, Roider et Maydl, 2001; Rojas, Drake et Roberts, 2001); ces deux études ne sont pas revues ici.

4.1.1.1 États-Unis

Une cohorte de 3 328 travailleurs de la mine souterraine Homestake au Dakota du Sud a fait l'objet d'une étude de mortalité dont les résultats ont été présentés dans plusieurs publications (Calvert, Steenland et Palu, 1997; Steenland et Brown, 1995a; Steenland *et al.*, 2001). Les chercheurs s'intéressaient principalement aux expositions à la silice cristalline et aux amphiboles non amiantiformes, car l'air de la mine contenait notamment de la cummingtonite-grunérite et de la trémolite-actinolite; ils mentionnent également la possibilité d'exposition à l'arsenic et au radon. L'exposition a été estimée à l'aide d'une matrice emplois-expositions développée à partir des données de mesure dans la mine. Les données sur le tabagisme n'étaient disponibles que pour 602 mineurs et dataient de 1960, sans mise à jour de l'information, ce qui explique que les résultats n'aient pas été ajustés pour ce facteur (Steenland et Brown, 1995a).

Cancers

Le suivi de la cohorte de mineurs d'or entre 1940 et 1990 a montré, sur un total de 303 décès par cancer, une augmentation non significative de 13 % des décès par **cancer du poumon** (n = 113), lorsque la mortalité était comparée à celle de la population générale des États-Unis et une augmentation statistiquement significative de 59 % en comparaison avec la population de l'État du Dakota du Sud. En utilisant comme groupe de référence la population générale américaine, cette augmentation atteignait 27 % après 30 ans et plus depuis l'embauche. Cependant, il n'y avait pas de relation dose-réponse avec l'indicateur cumulatif d'exposition aux poussières totales. Les auteurs considèrent que le tabagisme pourrait expliquer environ 7 % de l'augmentation du risque. Cette analyse a aussi mis en évidence une augmentation non statistiquement significative de **cancers hématopoïétiques** (n = 35, rapport de mortalité standardisé¹⁰ (RMS) = 1,29), de **cancers du péritoine** (n = 4, RMS = 2,81) et d'**autres cancers respiratoires** (n = 3, RMS = 2,54), mais les auteurs n'ont trouvé aucune mention de **mésothéliome** sur les certificats de décès. Le risque de décès par **lymphomes non hodgkiniens** atteignait la signification statistique après une dose cumulative de poussières totales de 48 000 « poussières-jours »¹¹ (n = 5, RMS = 3,29) (Steenland et Brown, 1995a).

Maladies non cancéreuses

Parmi les 1 551 décès signalés dans cette cohorte, 206 avaient comme cause une maladie respiratoire. Une augmentation statistiquement significative de décès par **tuberculose** (n = 36 dont 21 cas de silico-tuberculose, RMS = 3,52) et par **pneumoconiose** (n = 92, RMS = 2,61) a été rapportée. Pour ces causes de décès, il y avait une relation dose-réponse statistiquement significative avec l'indice cumulatif d'empoussièrement calculé en poussières-jours (Steenland et Brown, 1995a). Le risque de décès et d'incidence de **silicose** atteignait 2,49 pour chaque augmentation de l'exposition cumulative de 1 mg de silice/m³-année (Steenland et Brown, 1995b). Quarante des 92 certificats de décès pour « autre maladie respiratoire » comportaient les termes silicose ou pneumoconiose, dont un précisait une **amiantose** (Steenland et Brown, 1995a), témoignant d'une exposition antérieure à des fibres amiantiformes.

4.1.1.2 Afrique du Sud

Plusieurs études épidémiologiques ont été effectuées, par le même groupe de chercheurs, avec un accent particulier sur la silicose et les maladies respiratoires chroniques chez les mineurs de Witwatersrand en Afrique du Sud, avec ajustement pour le tabagisme pour la grande majorité des mineurs (Hnizdo et Murray, 1998; Hnizdo, Murray et Klempman, 1997; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991, 1993; Nelson, G., Girdler-Brown, Ndlovu et Murray, 2010; Reid et Sluis-Cremer, 1996). Un autre groupe de chercheurs a publié quelques articles sur les maladies respiratoires à l'exception des cancers chez des mineurs de la province de l'Ouest où se trouve Witwatersrand (Churchyard *et al.*, 2004; Hessel, Sluis-Cremer et Hnizdo, 1990; Nelson, G. *et al.*, 2010). Les expositions étudiées en lien avec les problèmes de santé dans les mines d'or étaient causées par la silice cristalline et la poussière totale (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991). Les

¹⁰ Divers indicateurs de risque sont utilisés selon le type de maladie et d'étude épidémiologique (voir glossaire à l'annexe A). Ils peuvent tous être interprétés comme suit : « risque = 1 » signifie que le risque dans le groupe exposé est le même que celui dans un groupe non exposé; « risque > 1 » signifie que le risque parmi les exposés est plus grand que celui parmi les non-exposés.

¹¹ Un « poussières-jour » correspond à une journée d'exposition à 1 million de particules par pied cube (mpppc)

chercheurs ont aussi exploré la possibilité d'effets associés à l'uranium, car les récifs de Witwatersrand renferment des minéraux qui en contiennent (Hnizdo *et al.*, 1997). Aucun de ces articles ne mentionne la présence de fibres mesurées isolément ou dans les poussières; les données d'exposition ont été estimées à l'aide d'une matrice emplois-expositions constituée à partir de mesures effectuées durant les années 1940, 1950 et 1960 (Hnizdo *et al.*, 1997; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991).

Cancers

L'analyse des données de 2 209 mineurs blancs embauchés entre 1938 et 1943 (suivis jusqu'à la fin de 1986) a montré une augmentation statistiquement significative du risque de décès par **cancer du poumon** (n=77) associée à l'exposition cumulative aux poussières respirables (augmentation de 2,3 % pour chaque 1 000 particules-année d'exposition), après ajustement pour l'âge et le tabagisme (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991). Une analyse de type cas-témoins du même groupe de travailleurs duquel 78 mineurs décédés de cancer du poumon ont été appariés à 386 mineurs décédés d'autres causes non précisées, a établi une relation exposition-réponse statistiquement significative associée à l'exposition cumulative à la poussière (risque relatif ou RR=3,19) ou à la présence de silicose (RR=2,45) ainsi qu'au tabac, mais pas à la production d'uranium dans la mine (certains minéraux contenant de l'uranium auraient aussi été traités dans cette mine) (Hnizdo *et al.*, 1997). Une autre étude, faite en partie auprès des mêmes mineurs, a exploré les causes de décès chez 4 925 mineurs blancs, suivis jusqu'à la fin de 1989 (Reid et Sluis-Cremer, 1996); les auteurs ont rapporté une augmentation statistiquement significative de décès par cancer du poumon associée au tabagisme (RMS = 2,41), sans lien avec la durée du travail minier ou avec un indice cumulatif d'empoussièrément (Reid et Sluis-Cremer, 1996). Finalement, une étude cas-témoins effectuée parmi des mineurs blancs décédés, pour lesquels une autopsie avait été effectuée, n'a pas établi d'association entre le cancer primaire du poumon et la présence de silicose, après ajustement pour l'âge, le tabagisme et l'exposition cumulative à la poussière (Hessel *et al.*, 1990).

Maladies non cancéreuses

Dans une cohorte de 2 235 de ces mineurs d'or suivis entre 1968-71 et 1991, une augmentation du risque de **silicose** (n = 326) s'accroissait de façon importante après 7 mg/m³-année d'exposition aux poussières (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1993). Ces mineurs présentaient aussi une augmentation statistiquement significative du risque de décéder par une **bronchopneumopathie obstructive chronique** (n = 176, RMS = 1,89) (Reid et Sluis-Cremer, 1996). Parmi ces travailleurs, le risque de contracter une **tuberculose** augmentait avec l'empoussièrément cumulatif (augmentation du risque de 7 % pour chaque augmentation d'un mg/m³-année de poussières) (Hnizdo et Murray, 1998). L'analyse récente d'une série d'autopsies parmi des mineurs d'or décédés de causes accidentelles entre 1975 et 2007 a aussi fait ressortir une augmentation du risque de **silicose**, alors que 3,6 % des mineurs avec moins de 10 ans de durée d'emploi et 32,5 % des mineurs avec 25 ans et plus d'ancienneté étaient atteints de silicose lors de l'autopsie (Nelson, G. *et al.*, 2010). En 2000, environ 20 % des 520 mineurs actifs d'une compagnie minière présentaient des signes radiologiques de **silicose** (Churchyard *et al.*, 2004).

4.1.1.3 Australie

Malgré l'existence de plusieurs mines d'or sur le continent australien, seuls les mineurs en Australie-Occidentale semblent avoir fait l'objet d'études épidémiologiques, en particulier ceux de la mine de Kalgoorlie avec 2 294 mineurs d'or ayant participé à trois enquêtes entre 1961 et 1975. Dans toutes ces études, l'accent en ce qui a trait à l'exposition a porté sur le contenu en silice cristalline des poussières de mine, en différenciant selon que le travail se faisait en surface ou sous terre (de Klerk, N. H., Ambrosini, Pang et Musk, 2002; de Klerk, N. H. et Musk, 1998; de Klerk, N.H., Musk, Tetlow, Hansen et Eccles, 1995; Peters, Reid, Fritschi, Musk et de Klerk, 2013). L'exposition à la silice a été estimée par un score de 1 à 10 attribué aux titres d'emploi de la mine par un panel d'experts constitué spécialement pour l'étude. Des données individuelles étaient disponibles sur la consommation de tabac, et les dossiers d'indemnisation pour maladie professionnelle ont aussi été étudiés (de Klerk, N. H. et Musk, 1998). Plus récemment, une analyse des données administratives de suivi médical du département des mines de l'Australie-Occidentale a montré l'incidence des cancers diagnostiqués chez 16 311 mineurs d'or entre 1996 et 2013; les données sur l'exposition des mineurs se limitaient au type de minerai (or, fer, autre métal, non-métal) et à une indication selon laquelle le travail était de type souterrain ou en surface (Sodhi-Berry *et al.*, 2017).

Cancers

Le statut vital et la survenue de maladies ont été étudiés pour la période de 1961 à 1993 et ont mis en évidence une augmentation statistiquement significative de 49 % des décès par **cancer du poumon** (n = 138), avec une relation dose-réponse statistiquement significative en relation avec la durée du travail dans la mine (en surface et souterrain) et avec le score d'exposition cumulative à la silice cristalline, après ajustement pour le tabagisme et la présence de bronchite. Ce risque était presque exclusivement restreint à des personnes atteintes de silicose (de Klerk, N. H. et Musk, 1998). Une étude plus récente de la même cohorte de mineurs, avec un suivi de l'état de santé jusqu'en 2009, a montré une augmentation statistiquement significative du risque de décès par **cancer du poumon** (n = 182) de 64 %; cette augmentation était restreinte aux mineurs souterrains (RMS = 1,82), alors que le risque n'augmentait pas pour les mineurs de surface (Peters *et al.*, 2013). Le risque associé à un nouveau diagnostic de cancer du poumon était encore plus élevé (rapport d'incidence standardisé ou RIS = 2,03 pour les mineurs souterrains) (Peters *et al.*, 2013). Le seul autre site de cancer mentionné est la **prostate**; les auteurs rapportent une augmentation non statistiquement significative de 44 % de décès (n = 37) parmi les mineurs de surface et une augmentation de 31 à 33 % des nouveaux diagnostics (n = 122) de ce cancer, qui atteignait la signification statistique parmi les travailleurs souterrains (plus nombreux que les mineurs de surface) (Peters *et al.*, 2013). Une étude de cas de trois mineurs retraités rapporte un cas de **mésothéliome** et précise que le mineur atteint n'avait pas d'expositions connues à l'amiante outre la possibilité d'exposition dans les mines d'or. L'auteur mentionne que des fibres d'amiante auraient été trouvées dans l'air des mines selon le témoignage d'un hygiéniste du travail devant le gouvernement à la suite d'un rapport d'enquête sur la problématique de l'amiante dans la ville de Wittenoom (Lee, De Klerk et Musk, 1999).

Dans l'étude des données de suivi médical des mineurs d'Australie-Occidentale, ceux n'ayant travaillé que dans des mines d'or présentaient des risques statistiquement significatifs de **cancer du poumon** et de **cancer colorectal** plus élevés de 77 % et de 70 %, respectivement, que ceux des mineurs ayant travaillé avec plusieurs types de minéraux. Le risque de **mésothéliome** (n = 8 cas) était également supérieur, mais non statistiquement significatif, avec

un risque de 1,90 par rapport à celui des mineurs exposés à d'autres minéraux (Sodhi-Berry *et al.*, 2017).

Maladies non cancéreuses

L'étude de 1998 a mis en évidence une augmentation statistiquement significative de décès par **pneumoconiose** ($n = 48$) avec un RMS de 11,2. Sur 1 040 mineurs ayant fait une demande d'indemnisation, celle-ci a été accordée à 631 d'entre eux pour **pneumoconiose**; l'incidence de la maladie augmentait de façon statistiquement significative avec le tabagisme, la durée de travail dans les mines de surface et les mines souterraines et l'intensité de l'exposition à la silice (de Klerk, N. H. et Musk, 1998). Les chercheurs ont noté qu'aucune indemnisation pour silicose n'a été accordée pour les travailleurs ayant commencé à travailler dans les mines depuis 1974, soit après l'abaissement des normes d'exposition en Australie (de Klerk, N. H. *et al.*, 2002). Un rapport de cas sur trois mineurs retraités d'Australie-Occidentale mentionne que deux d'entre eux présentaient des **plaques pleurales** et que ces mineurs n'avaient pas subi d'expositions significatives connues à l'amiante, malgré que des fibres d'amiante avaient déjà été décelées dans l'air des mines d'or d'Australie-Occidentale (Lee *et al.*, 1999).

4.1.1.4 France

Les mineurs d'or français ont fait l'objet d'une seule étude depuis 1990. Cette étude de mortalité portait sur 1 330 travailleurs d'une compagnie minière à Salsigne (dans le Languedoc-Roussillon) opérant aussi une affinerie d'or, dont 720 sujets avaient déjà travaillé à la mine (Simonato *et al.*, 1994). Les expositions d'intérêt à cet endroit étaient aux sels solubles et insolubles d'arsenic, à la silice cristalline et au radon. Aucune mention de fibres n'est trouvée dans l'article. Cette étude présente toutefois quelques limites méthodologiques qui en diminuent la fiabilité. Premièrement, il s'agit d'une « jeune » cohorte, comprenant des travailleurs embauchés après 1954, tous encore vivants en 1972 et dont la majorité des travailleurs étaient en vie au moment de l'étude (201 décès, soit 15,1 % de la cohorte); deuxièmement, la principale cause de décès a été déterminée pour 79,6 % des travailleurs et le statut vital était inconnu pour 32 sujets, ce qui représente de petits nombres lorsque les diagnostics individuels sont considérés; et finalement, les risques n'ont pas pu être ajustés pour le tabagisme (Simonato *et al.*, 1994).

Cancers

Les auteurs ont rapporté, chez les mineurs, une augmentation statistiquement significative du risque de décès par **cancer du poumon** ($n = 19$, RMS = 2,17) et par **maladie de Hodgkin** ($n = 2$, RMS = 11,76), avec une augmentation non significative de la mortalité par leucémie basée sur deux décès. Le risque de décès par **cancer du poumon** augmentait avec la durée d'emploi à la compagnie, avec des RMS passant de 2,17 (moins de 10 années de service) à 2,66 (20 ans et plus) chez les mineurs, et de 2,07 à 2,47 chez les travailleurs de l'affinerie (Simonato *et al.*, 1994). Les auteurs concluent que les expositions à l'arsenic, à la silice et au radon ont toutes pu contribuer à cette hausse du nombre de décès par cancer du poumon.

Maladies non cancéreuses

L'étude de Simonato *et al.* n'a mis en évidence aucun excédent de mortalité par maladies autres que le cancer chez les travailleurs de la compagnie en comparaison avec la population générale française (Simonato *et al.*, 1994).

4.1.1.5 République populaire de Chine

La seule étude répertoriée chez des mineurs d'or en Chine a été effectuée auprès de 574 travailleurs actuels et anciens d'une petite mine d'or souterraine du comté de Xiushui (province de Jiangxi) au sud-est de la République populaire de Chine (Tse, Li, Wong, Fu et Yu, 2007). Cette étude s'intéressait à la silicose accélérée chez les mineurs et aucune mention de PMA n'est relevée dans l'article publié.

Les auteurs ont rapporté une prévalence de **silicose accélérée** de 29,1 % (167 cas) après une moyenne de seulement 5,6 ans d'exposition aux poussières (étendue de 2 mois à 14 ans), et une silicose soupçonnée chez 138 autres mineurs (24 %), en soulignant que le risque augmentait avec une histoire de tuberculose rapportée par les mineurs. La proportion de fumeurs était semblable chez les silicotiques et les travailleurs sans silicose, mais l'histoire tabagique n'était disponible que pour 57,1 % des travailleurs.

4.1.1.6 Canada

La seule étude canadienne publiée sur les mines d'or traite de la mortalité d'une cohorte ontarienne de 13 603 mineurs ayant travaillé au moins deux semaines dans une des mines ontariennes ou au moins 60 mois dans une mine ailleurs au pays (Kusiak, Springer, Ritchie et Muller, 1991). Aucune autre étude n'a été recensée sur l'état de santé des mineurs du Québec ou des autres provinces canadiennes. Les personnes ayant travaillé dans une mine d'amiante ou dans une mine d'uranium à l'extérieur de l'Ontario étaient exclues, alors que celles qui avaient travaillé dans de telles mines en Ontario étaient retenues. Les expositions d'intérêt étaient principalement les fibres minérales, l'arsenic et le chrome, mais les fumées d'explosion, la poudre d'aluminium (utilisée en prophylaxie des maladies pulmonaires) et les émissions de moteurs diesels ont aussi fait l'objet d'analyse. L'indicateur d'exposition aux fibres minérales était la durée d'emploi dans les mines d'or contenant de la komatiite (roche susceptible de se modifier en serpentines ou en amphiboles), car aucune mesure de fibres n'était disponible. Les habitudes tabagiques d'environ 340 mineurs ont pu être considérées dans cette cohorte relativement jeune dans laquelle 17,9 % des sujets étaient décédés (n = 9690) au moment de l'étude (Kusiak, Ritchie, Muller et Springer, 1993).

Cancers

Les auteurs ont rapporté une augmentation statistiquement significative de décès par **cancer du poumon** (n = 236) chez les travailleurs ayant commencé leurs activités professionnelles avant 1946 dans une de 42 mines d'or de la province (RMS = 1,40), mais il n'y avait pas de surmortalité chez les personnes ayant été embauchées après 1945 (Kusiak *et al.*, 1991). Une relation exposition-réponse a été mise en évidence en lien avec le nombre d'années de travail avant 1946 dans les mines dont le minerai contenait au moins 0,1 % d'arsenic et avec le nombre de mois d'exposition aux produits de désintégration du radon (au moins 5 ans après le début de l'exposition). Aucune association entre la mortalité par cancer du poumon et l'exposition aux fibres minérales n'a été mise en évidence et les auteurs mentionnent, en conclusion, que l'excédent de cancer du poumon est probablement attribuable à l'exposition aux produits de dégradation du radon et à la silice cristalline. Les auteurs notent que deux cas de **mésothéliome** ont été diagnostiqués parmi ces mineurs et qu'aucun d'entre eux n'avait travaillé dans une mine contenant de la komatiite.

Quant au **cancer de l'estomac** (n = 104), un excès de mortalité a été observé de cinq à 19 ans après la première embauche dans une mine d'or ontarienne, peu importe le lieu de naissance (RMS = 2,55 ou 2,70 selon la naissance en Amérique du Nord ou à l'extérieur respectivement) (Kusiak, Ritchie, Springer, *et al.*, 1993). Parmi les travailleurs décédés 20 ans ou plus après l'embauche, l'excès était plus élevé chez les travailleurs nés à l'extérieur de l'Amérique du Nord (excès de 60 % contre 13 % chez les natifs de l'Amérique du Nord) et chez les travailleurs âgés de moins de 60 ans au moment du diagnostic (excès de 67 % contre 43 % chez les mineurs d'or de 60 à 74 ans). Parmi les travailleurs âgés de moins de 60 ans lorsque le diagnostic a été posé, une association statistiquement significative a été montrée entre l'excédent de mortalité par cancer de l'estomac et l'exposition pondérée au chrome contenu dans les poussières. Parmi tous les travailleurs de moins de 75 ans, il y avait une tendance non statistiquement significative (p = 0,07) d'association exposition-réponse entre l'excédent de mortalité par cancer de l'estomac et la durée de travail dans les mines contenant de la komatiite (indicateur de la possibilité de présence de fibres).

Maladies non cancéreuses

Seul un rapport gouvernemental a été publié sur les décès par maladies non cancéreuses parmi la cohorte de mineurs ontariens (Muller, Wheeler, Gentleman, Suranyi et Kusiak, 1983). Ce rapport fait état d'excès statistiquement significatifs de mortalité par **silico-tuberculose** (RMS = 61,4) et par **silicose** et **pneumonie interstitielle chronique** (RMS = 16,9) pour l'ensemble des travailleurs souterrains des mines d'or étudiées. Chez les mineurs d'or travaillant sous terre et à temps partiel à la surface, les risques étaient également élevés pour les mêmes maladies, mais à un niveau moindre

4.1.1.7 Résumé des études épidémiologiques dans les mines d'or

Les études répertoriées tendent à montrer une augmentation statistiquement significative, de l'ordre de 13 à 117 %, du risque de décéder d'un **cancer du poumon** chez les travailleurs des mines d'or. L'intensité du risque est généralement associée à la durée de travail (4/6 études positives), alors que le risque devient plus élevé après 30 ans de travail minier. Des associations exposition-réponse statistiquement significatives avec l'exposition à la silice cristalline ont été rapportées dans 3 études sur 4 présentant des analyses sur la silice. Les deux études portant une attention particulière aux fibres minérales n'ont pas trouvé de relation statistiquement significative entre l'exposition aux poussières contenant des fibres et le décès par cancer du poumon.

Il existe peu d'information relative aux **autres sites de cancer** chez les travailleurs des mines d'or, quelques études rapportant des excès statistiquement significatifs de mortalité pour certains cancers hématopoïétiques (2 études), pour les cancers du péritoine, de l'estomac, du côlon et rectum et de la prostate (1 étude pour chacun de ces sites de cancer). Une seule étude a rapporté un excès non statistiquement significatif de mésothéliome chez les mineurs d'or comparés à des mineurs exposés à d'autres minéraux.

Quant aux maladies respiratoires non cancéreuses, la **silicose** et les **pneumoconioses** sans précision présentent un risque systématiquement élevé (4/5 études), alors que la mortalité causée par plusieurs maladies respiratoires est rapportée comme élevée dans une seule étude.

Tableau 4. Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques sur les travailleurs des mines d'or

Pays (nombre d'articles)	Cancer	Maladie pulmonaire non cancéreuse	Exposition associée
États-Unis (n = 2)	Poumon (M), péritoine (M), cancers hématopoïétiques s.p. (M)	Silicose (M), silico-tuberculose (M)	<ul style="list-style-type: none"> • Risque élevé > 30 ans d'ancienneté • Relation exposition-réponse avec indice cumulatif (mais pas durée d'exposition) de silice cristalline et poussières totales • Pas d'association avec les PMA
Afrique du Sud (n = 3)	Poumon (M)	Pneumoconiose (M), pneumonie (M), BPCO (M) bronchite (M)	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse : tabac, silice cristalline, poussières totales • Pas de mention de PMA
Australie de l'Ouest (n = 5)	Poumon (M et I), prostate (I), colorectal (I) [8-9 cas de mésothéliome]	Pneumoconiose (M)	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse : silice cristalline, poussières totales, travail souterrain • 1 étude : mineurs d'or comparés à des mineurs exposés à d'autres minéraux • Pas de mention de PMA
France (n = 1)	Poumon (M), maladie de Hodgkin (M)	Aucune statistiquement significative	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse : durée du travail minier, travail avant 1955 • Pas de mention de PMA
République populaire de Chine (n = 1)	--	Silicose accélérée (I)	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition moyenne à la silice cristalline : 5,6 ans • Pas de mention de PMA
Canada (n = 2)	Poumon (M), estomac (M) [2 cas de mésothéliome]	--	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Poumon</u> : Relation exposition-réponse : arsenic (avant 1946), radon • <u>Estomac</u> : Relation exposition-réponse avec durée de travail, exposition cumulative au chrome • Pas d'association avec les PMA

BPCO, bronchopneumopathie chronique obstructive (anciennement maladie pulmonaire obstructive chronique ou MPOC); (I), incidence (nouveaux cas); (M), mortalité; PMA, particules minérales allongées; s.p., sans précision

4.1.2 Mines de fer incluant les mines de taconite

En 2015, dix pays ont produit chacun plus de 35 millions de tonnes métriques de fer brut, soit 94,6 % de la production mondiale, la Chine produisant à elle seule 41,6 % du minerai total (U.S. Geological Survey, 2016). Les mineurs de fer de trois de ces pays, et ceux de la France et de la Slovaquie, ont fait l'objet d'études épidémiologiques portant sur le cancer et les maladies respiratoires publiées depuis 1990. Les résultats de ces études sont résumés au tableau 5 et présentés plus en détail à l'annexe B.II. Ces études ont abordé l'exposition aux poussières

totales, à la silice cristalline, aux émissions de moteurs diesels et au radon. Seules les études américaines ont porté une attention particulière aux fibres minérales non amiantiformes, notamment dans les mines de taconite du Minnesota.

4.1.2.1 États-Unis

Depuis 1970, des préoccupations au sujet de la santé des travailleurs et de la population ont été soulevées dans les environs des mines de taconite du Mesabi Iron Range, au nord-est du Minnesota (Axten et Foster, 2008; Wilson, McConnell, Ross, Axten et Nolan, 2008), notamment après la découverte de PMA dans l'eau potable provenant du lac Supérieur, à la suite du dépôt de résidus miniers de taconite dans ce plan d'eau (Allen, 2014). L'exploitation de la taconite, un minerai de quartzite ferrifère constitué de silice cristalline et d'oxydes de fer, a débuté dans les années 50. Avant 1990, une première étude menée dans une des mines n'avait pas montré d'augmentation du risque de cancers pulmonaires (Higgins, Glassman, Oh et Cornell, 1983), tout comme une autre étude de mortalité menée dans deux autres mines (Cooper, W. C., Wong et Graebner, 1988).

Toutes les études américaines publiées depuis 1990 traitent de la santé des travailleurs des mines de taconite dans l'État du Minnesota, dont plusieurs effectuées à partir d'une cohorte de 68 737 personnes ayant travaillé dans sept mines du nord-est de l'État (Allen, 2014). En 2008, une vaste étude épidémiologique sur la santé des travailleurs de la taconite, financée par l'État du Minnesota, a été lancée à partir de cette cohorte, après qu'un nombre élevé de mésothéliomes ait été démontré parmi ces travailleurs. Cette étude, conduite sous la responsabilité de l'Université du Minnesota, incluait six composantes: (1) évaluation professionnelle de l'exposition, (2) étude de la mortalité de la cohorte professionnelle, (3) étude de l'incidence des cancers, (4) étude cas-témoins sur le mésothéliome, (5) étude cas-témoins sur le cancer du poumon, (6) étude transversale sur la santé respiratoire (incluant les conjoints) (Finnegan et Mandel, 2014).

Parmi les expositions d'intérêt mentionnées dans les études sur les travailleurs de la taconite se trouvent celles à la silice, au quartz, aux poussières respirables, aux PMA non amiantiformes, aux amphiboles et aux non-amphiboles, de même qu'aux fragments de clivage de PMA (Allen, 2014).

Cancers

Un suivi additionnel de cinq ans des 3 444 mineurs et travailleurs de moulin de taconite déjà étudiés entre 1947 et 1983 a mis en évidence une augmentation non significative du risque de décès par cancers du **côlon** et du **rein** et par cancers **hématopoiétiques**, alors que le risque de décès par cancer du **poumon** était statistiquement plus faible parmi les travailleurs de la mine (Cooper, W.C., Wong, Trent et Harris, 1992).

Un rapport de surveillance des cancers publié par le Département de la santé de l'État a révélé un excès statistiquement significatif de décès par **mésothéliome** chez les hommes du nord-est du Minnesota, parmi lesquels se trouvaient d'anciens mineurs (Minnesota Department of Health, 1997). À la suite de cette publication, la Minnesota Taconite Workers Health Study, menée par l'École de santé publique de l'Université du Minnesota, a donné lieu à la publication de quatre articles traitant des causes de décès et des nouveaux diagnostics de cancers parmi les travailleurs de la taconite (Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015; Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F.,

Nelson, H.H., Ryan, A.D., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015; Allen, 2014; Lambert *et al.*, 2016). Ces articles ont mis en évidence une augmentation statistiquement significative du risque de recevoir un nouveau diagnostic de cancer du **poumon** (n = 973, RIS = 1,3), du **larynx** (n = 94, RIS = 1,4), de l'**estomac** (n = 105, RIS = 1,4) et de **mésothéliome** (n = 51, RMS = 2,4) (Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015); le risque de décès par cancer était statistiquement significatif pour le cancer du poumon (n = 949, RMS = 1,16) et le mésothéliome (n = 30, RMS = 2,77) (Allen, 2014). Cependant, le contenu de ces articles n'établit aucune association avec la durée d'exposition dans les mines de taconite ou avec l'intensité cumulative d'exposition aux PMA. Une étude cas-témoins effectuée parmi la cohorte de mineurs a confirmé l'absence de relation exposition-réponse pour le cancer du poumon (n = 1 706, RC = 0,99) (Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ryan, A.D., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015), alors qu'une autre a montré une association à la limite de la signification statistique entre le diagnostic de mésothéliome et le nombre d'années d'emploi dans les mines de taconite (n = 57, RR = 1,03), de même que l'exposition cumulative aux PMA (n = 57, RR = 1,10) (Lambert *et al.*, 2016). Quelques auteurs cités plus haut concluent que les résultats des études chez les travailleurs de la taconite ne suggèrent pas d'effet cancérogène des PMA non amiantiformes sur le poumon, mais montrent une possibilité d'association avec le mésothéliome. Ils soulignent cependant que la toxicité plus faible des PMA non amiantiformes de petite dimension ne peut expliquer complètement le risque élevé rapporté dans les études des travailleurs de la taconite (Mandel, Ramachandran et Alexander, 2016).

Maladies non cancéreuses

L'étude de mortalité mentionnée plus haut (Allen, 2014) a rapporté un excès de décès par maladies cardiaques, mais aucun excès par maladie pulmonaire non cancéreuse, parmi les mineurs ayant au moins un an d'expérience comparativement à la population générale du Minnesota. Une étude transversale a été effectuée dans le but d'évaluer l'association entre l'exposition aux poussières et les maladies respiratoires non cancéreuses chez les travailleurs actuels et anciens de six mines de taconite du nord-est du Minnesota. Un rapport et un article ont été publiés sur cette partie de l'étude (Finnegan et Mandel, 2014; Odo, Mandel, Perlman, Alexander et Scanlon, 2013). Les auteurs concluent que la prévalence d'anomalies pulmonaires et pleurales est plus élevée chez les travailleurs des mines que chez leur conjoint (respectivement 5,4 % et 16,7 % pour les travailleurs des mines contre 0,6 % et 4,5 % pour les conjoints). En particulier, la prévalence d'**anomalies pleurales** est associée à la durée d'emploi dans l'industrie de la taconite (augmentation de 2 % pour chaque année supplémentaire de travail et RIS = 1,84 pour 35 ans et plus – n = 51/172). L'analyse selon la concentration cumulative de PMA a aussi montré une association significative, toujours avec les anomalies pleurales (augmentation de 6 % pour chaque PMA/ml-année supplémentaire et RIS = 1,93 pour les travailleurs ayant subi une exposition cumulative au-dessus de la médiane (1,16 PMA/ml-année, n = 150/565) (Finnegan et Mandel, 2014). La prévalence de problèmes respiratoires obstructifs varie de façon substantielle selon les critères des tests utilisés, mais elle reste plutôt stable pour les problèmes restrictifs (3,2 à 7,8 % selon les critères) (Odo *et al.*, 2013). Les limites majeures de cette étude sont le groupe de comparaison peu commun (les époux des travailleurs) et le manque probable de représentativité des travailleurs étudiés par rapport à l'ensemble des travailleurs des mines de taconite (participation de 32,7 % des travailleurs approchés, proportion importante de sujets obèses, 75 % de sujets de 55 ans et plus retraités, mais capables de parcourir de longues distances pour participer à l'étude).

4.1.2.2 République populaire de Chine

En Chine, une étude a été répertoriée chez des mineurs d'hématite (Chen, S. Y. *et al.*, 1990; Chen, S. Y., Hayes, Wang, Liang et Blair, 1989) des mines de Longyan et de Taochong (provinces de Hebei et d'Anhui). Les mines d'hématite, ouvertes respectivement en 1917 et 1947, ont utilisé des procédés secs durant les premières décennies d'opération, puis des moyens de maîtrise de l'exposition introduits entre 1955 et 1963 ont permis de réduire l'empoussièremment sous les 10 mg/m³ en moyenne (Chen, S. Y. *et al.*, 1989). Au moment où ces études ont été effectuées, des mesures de benzo(a)pyrène, de radon et de ses produits de filiation, de même que de poussières totales et de plusieurs métaux étaient effectuées par les compagnies, mais l'intérêt des chercheurs portait principalement sur le radon (Chen, S. Y. *et al.*, 1990).

Une étude a aussi été effectuée auprès des travailleurs chinois exposés à la silice cristalline dans différentes industries, dont six mines de fer-cuivre de la province de Hebei (Chen, J. *et al.*, 1992; Chen, W., Bochmann et Sun, 2007; McLaughlin *et al.*, 1992). Des données historiques de mesures de poussières totales, de silice, de radon, d'arsenic, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et, en concentrations minimales, d'amiante, de nickel, de talc et de cadmium étaient disponibles (McLaughlin *et al.*, 1992).

Cancers

Les auteurs ont observé une augmentation statistiquement significative de décès par **cancer du poumon** (n = 29, RMS = 3,7) et rapportent une relation exposition-réponse à la limite de la signification statistique avec le niveau d'empoussièremment (mesuré semi-quantitativement selon quatre catégories : absence d'exposition, expositions faible, moyenne ou forte). Le risque était plus élevé pour les travailleurs embauchés avant l'instauration de méthodes humides (n = 20, RMS = 4,8). Il n'y avait pas d'excès de cancer du poumon chez les non-fumeurs, mais les auteurs soulignent que le risque ne peut être attribué seulement au tabac, car un gradient de risque était présent en fonction du niveau d'exposition chez les fumeurs (Chen, S. Y. *et al.*, 1990). Les risques observés pour les autres cancers étaient plus bas que ceux de la population de référence, en particulier ceux de l'**estomac**, du **foie** et de l'**œsophage**. Comme souligné par les auteurs, les concentrations de poussières et de radon semblaient être corrélées, ce qui empêchait l'évaluation des effets indépendants de chaque exposition; de plus, le petit nombre de cas rendait impossible toute analyse détaillée.

L'étude de mortalité et l'étude cas-témoins parmi des travailleurs de plusieurs secteurs industriels avaient comme objectif de vérifier si l'exposition à la silice était liée à certaines causes de décès, particulièrement au cancer du poumon. Parmi les 18 231 travailleurs des mines de fer-cuivre, seul un excès statistiquement significatif de décès par cancer du **foie** a été identifié (RMS = 1,40) (Chen, J. *et al.*, 1992). L'analyse focalisée sur le cancer du **poumon** (75 cas et 277 témoins) n'a pas révélé de risque accru statistiquement significatif en relation avec l'exposition cumulative à la poussière totale, à la silice, aux HAP ou au radon, et ce, après ajustement pour l'âge et le tabagisme (Chen, W. *et al.*, 2007; McLaughlin *et al.*, 1992); les auteurs rapportent cependant une augmentation du risque de développer une **silicose** parmi les personnes souffrant de cancer du poumon (n = 15 silicotiques, risque de silicose = 3,1).

Maladies non cancéreuses

L'étude dans les mines d'hématite a révélé que 25 % de 5 406 mineurs (n = 1 335) avait reçu un diagnostic de **silicose**, dont 42 % souffraient en plus de **tuberculose**. Entre 1970 et 1982, 490 mineurs étaient décédés, dont 57 % d'une maladie respiratoire, certains décès s'étant produits avant l'âge de 40 ans (Chen, S. Y. *et al.*, 1989).

Dans les six mines de fer-cuivre, aucun excès de décès par **maladie pulmonaire** n'a été mis en évidence pour la période de 1972 à 1989. Cependant, une analyse plus fine des diagnostics de décès par maladie pulmonaire a permis de constater une augmentation statistiquement significative de décès par **pneumoconiose** (RMS = 15,9) vers la fin des années 1980 (les statistiques détaillées n'étaient pas disponibles pour la période antérieure) (Chen, J. *et al.*, 1992).

4.1.2.3 Suède

Plusieurs études ont été publiées sur la santé des mineurs de fer suédois, presque toutes effectuées par des chercheurs de l'Université d'Umeå. Les mines des régions de Malmberget et de Kiruna, ouvertes depuis une centaine d'années, ont commencé des opérations souterraines en 1923 à Malmberget et vers le milieu des années 1950 à Kiruna (Björ, B. *et al.*, 2009). Les études effectuées se focalisent sur le lien entre vibrations et maladies cardiaques (Björ, B. *et al.*, 2009), entre exposition au quartz, aux émissions de moteurs diesels et au radon avec le cancer du poumon (Bergdahl, Jonsson, Eriksson, Damber et Järholm, 2010; Jonsson *et al.*, 2010), la silicose (Hedlund, Jonsson, Eriksson et Järholm, 2008) ou l'inflammation des voies respiratoires (Adelroth, 2006). Aucune mention de fibres n'a été retrouvée dans ces articles.

Cancers

Parmi une cohorte de 13 621 mineurs ayant travaillé au moins un an entre 1923 et 1996, 4 504 décès ont été observés entre 1952 et 2001. Différentes analyses ont mis en évidence un excès statistiquement significatif de décès de 12 % par **cancer (tous sites)** et de risques plus élevés chez les mineurs souterrains (Björ, B. *et al.*, 2009; Björ, O., Jonsson, Damber, Wahlstrom et Nilsson, 2013) et associés à la durée de travail souterrain (Björ, O. *et al.*, 2013). L'analyse portant sur les nouveaux diagnostics de cancer parmi les mêmes mineurs a révélé un excès statistiquement significatif de cancer du **poumon** (RIS = 1,74), de l'**estomac** (RIS = 1,25), de la **peau (non mélanique)** (RIS = 1,39) et des **lèvres** (RIS = 1,69) chez les mineurs souterrains. Cependant, il n'y avait pas d'association exposition-réponse avec la durée de travail pour ces sites de cancer (Björ, O. *et al.*, 2013). D'autres analyses effectuées encore chez les mineurs de Kiruna et de Malmberget ont montré une association exposition-réponse entre le cancer du **poumon** et l'exposition au radon et à ses produits de filiation, de même qu'avec l'exposition au quartz et aux émissions de moteurs diesels (Bergdahl *et al.*, 2010; Jonsson *et al.*, 2010). Les auteurs soulignent qu'il est très difficile de distinguer la part du risque attribuable à une exposition en particulier à cause de la corrélation entre les divers contaminants trouvés dans l'air des mines.

Maladies non cancéreuses

Une analyse de mortalité effectuée chez les mêmes mineurs a montré un excès statistiquement significatif de décès de 21 % par maladie pulmonaire, notamment chez les mineurs souterrains (n = 228) et particulièrement pour la **BPCO** (excès de 25 %, n = 90); cet excès n'était pas associé à la durée de travail minier en général ou de travail souterrain (Björ, O. *et al.*, 2013).

Dans le contexte de l'étude sur la bronchite chronique dans le nord de la Suède (Obstructive Lung Disease in Northern Sweden, OLIN), une enquête par voie postale chez des mineurs de Malmberget (taux de participation de 86 %) a montré une prévalence significativement plus grande, avec des risques allant de 1,8 à 2,4, de **symptômes respiratoires** (sifflements récurrents, toux persistante ou productive, au moins un symptôme) et de **bronchite chronique** diagnostiquée par un médecin (risques de 2,2 à 2,5) (Hedlund, Jarvholm et Lundback, 2004; Hedlund, Järholm et Lundbäck, 2006); les risques étaient plus élevés parmi les non-fumeurs (Hedlund *et al.*, 2004).

4.1.2.4 France

Les mineurs de fer du bassin de Lorraine sont les seuls à avoir fait l'objet d'études ayant mené à trois publications au début des années 1990 (Chau *et al.*, 1993; Pham, Q.T. *et al.*, 1993; Pham, Q. T. *et al.*, 1992). Plus de 13 000 mineurs de cette région étaient vivants en janvier 1982 et l'expérience de travail et la survenue de maladies dans certains sous-groupes d'entre eux ont été analysées. L'intérêt des chercheurs portait sur l'exposition à la poussière totale, aux émissions de moteurs diesels et d'explosifs, et au radon. Aucune mention de fibres n'a été trouvée dans ces articles. En France, il est difficile d'identifier le statut vital des personnes. Ces analyses souffrent toutes d'un certain nombre de sujets dont le statut vital est inconnu; ce nombre est évalué à 16,2 % dans un des articles (Pham, Q. T. *et al.*, 1992), mais non rapporté dans les deux autres. Bien que les risques rapportés n'aient pas été ajustés pour le tabagisme, les auteurs en font état.

Cancers

Un des articles présente les résultats d'une étude de mortalité portant sur 13 801 mineurs vivants au 1^{er} janvier 1982 et qui ont été suivis jusqu'au 31 décembre 1986 (Pham, Q.T. *et al.*, 1993). Les renseignements disponibles sur l'exposition sont restreints à la durée totale de travail et de temps passé au fond de la mine selon les dossiers administratifs miniers. À partir de 1 596 décès dont la cause était connue sur les 1 813 décès s'étant produits en cinq ans, les auteurs ont rapporté une augmentation statistiquement significative de décès par les **cancers du poumon** (n = 238, RMS = 2,44), **de l'estomac** (n = 48, RMS = 2,48), des **voies aérodigestives supérieures** (n = 55, RMS = 1,29), ainsi que de la **vessie** et de la **prostate** (n = 41, RMS = 1,34) (Pham, Q.T. *et al.*, 1993). La surmortalité était statistiquement significative et encore plus importante après 30 ans et plus de travail souterrain pour les cancers du poumon (rapport de cote ou RC = 1,83) et des voies aérodigestives supérieures (RC = 5,05). Étant donné la forte proportion de fumeurs et l'ampleur des risques de décès obtenus, les auteurs mentionnent que la surmortalité par cancer des voies aérodigestives supérieures et des cancers de la vessie et de la prostate pourrait être plausiblement associée au tabagisme, mais que celle par cancers du poumon et de l'estomac ne peut être attribuable seulement au tabac. Les deux limites les plus importantes de l'étude sont l'absence d'information sur les travailleurs avant 1982 et la durée de suivi très courte (5 ans).

Les deux autres articles traitent du suivi, durant 10 ans, d'un échantillon aléatoire d'environ 1 170 parmi plus de 5 300 mineurs âgés de 33 à 55 ans et dont la radiographie pulmonaire était normale en 1975 (les nombres rapportés ne sont pas les mêmes dans les deux articles qui traitent cependant du même groupe de travailleurs (Chau *et al.*, 1993; Pham, Q. T. *et al.*, 1992)). Ce suivi a montré une augmentation statistiquement significative de décès par **cancer du poumon** ($n = 32$, RMS = 3,89) et une relation exposition-réponse avec la durée de travail souterrain de même que la quantité de cigarettes fumées. L'excès de décès par **cancer de l'estomac** était aussi statistiquement significatif, mais basé sur seulement 4 cas (RMS = 2,73), tous des fumeurs. Les principales limites méthodologiques de ces deux études sont le faible nombre de sujets et la faible durée de suivi, de même que les critères d'entrée dans la cohorte qui favorisaient les travailleurs en bonne santé.

Maladies non cancéreuses

L'article de Pham (Pham, Q.T. *et al.*, 1993) a mis en évidence une augmentation statistiquement significative de décès par **bronchite chronique** et **maladies pulmonaires obstructives** ($n = 166$) avec un RMS de 4,61, sans association avec le nombre d'années de travail souterrain. Les auteurs affirment cependant que le tabagisme n'expliquerait qu'une petite partie du risque. Des tests de fonction pulmonaire effectués chez ces mineurs à trois reprises durant les 10 années de suivi ont montré une diminution de la capacité vitale et du volume expiratoire maximal par seconde (VEMS) qui n'était significative que chez les retraités (Pham, Q. T. *et al.*, 1992) et serait attribuable à l'âge et au tabagisme selon les auteurs.

4.1.2.5 Slovaquie

Seul un court article a été publié en anglais sur les mineurs de fer slovaques. Cette étude cas-témoins a porté sur 140 cas de cancer du poumon dans le district de Rožnava et 60 cas du district de Nizna Slana dans la partie est de la Slovaquie (Icso, Szollosova et Sorahan, 1994). Des données de mesure d'exposition étaient disponibles pour la radiation alpha et les poussières totales; il y était mentionné que seule la mine de Nizna Slana avait utilisé de la machinerie diesel, l'autre n'ayant recours qu'à de la machinerie électrique. Les habitudes tabagiques n'étaient disponibles que pour une partie des mineurs malades et non pour l'ensemble des sujets de l'étude.

Les auteurs ont comparé la proportion de mineurs de fer parmi 200 nouveaux cas de **cancer du poumon** et 424 témoins non cancéreux. Après ajustement pour l'âge, ils ont mis en évidence un risque statistiquement plus élevé dans chacun des deux districts étudiés avec des risques relatifs (RR) de 2,81 à Rožnava ($n = 76$ cas mineurs) et de 4,01 à Nizna Slana ($n = 32$ cas mineurs). L'analyse n'a été ajustée pour aucun autre facteur que l'âge et aucune autre maladie n'a été étudiée dans ce seul article touchant la Slovaquie. La cohorte de travailleurs était aussi assez jeune (maximum de 20 ans depuis l'embauche), ce qui diminue la possibilité de voir se produire les maladies qui se développent après une longue période de latence comme la majorité des cancers.

4.1.2.6 Australie-Occidentale

Un seul article, portant sur les cancers des mineurs de fer, a été recensé en Australie-Occidentale. Cette analyse des données administratives de suivi médical du Département des mines de l'Australie-Occidentale a montré l'incidence des cancers diagnostiqués chez 22 901 mineurs de fer entre 1996 et 2013; les données sur l'exposition des mineurs se limitaient au

type de minerai (or, fer, autre métal, non-métal) et à une indication relative au travail souterrain ou en surface; l'étude a mis en évidence une augmentation non statistiquement significative du risque de cancer du poumon (41 cas) et de mésothéliome (7 cas) chez les mineurs de fer comparés aux travailleurs d'autres types de mines (Sodhi-Berry *et al.*, 2017).

4.1.2.7 Canada

Depuis 1990, aucune publication scientifique n'a été répertoriée ni sur l'exposition à des agents cancérogènes ou fibrogènes ni au regard des effets sur la santé des mineurs de fer québécois et canadiens.

4.1.2.8 Résumé sur les études épidémiologiques dans les mines de fer

Les études répertoriées tendent à montrer une augmentation, pas toujours statistiquement significative et allant parfois jusqu'à 144 %, du risque de décéder d'un **cancer du poumon** chez les travailleurs des mines de fer. L'intensité du risque est généralement associée à la durée de travail et l'impact du tabagisme sur cette intensité reste difficile à départager. Des associations exposition-réponse statistiquement significatives ont été rapportées avec l'exposition à la silice cristalline, au radon et aux émissions de moteurs diesels. Les études américaines portant une attention particulière aux fibres minérales ont mis en évidence une augmentation du risque chez les travailleurs des mines de taconite, mais la relation entre l'exposition aux PMA et le risque de cancer du poumon n'existait plus après ajustement pour le sexe, l'exposition à la silice et à l'amiante et le travail dans les mines d'hématite (Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ryan, A.D., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015).

En ce qui a trait au **mésothéliome**, seules les études américaines ont rapporté des résultats et montrent une association exposition-réponse à la limite de la signification statistique avec la durée d'emploi dans les mines de taconite et l'exposition cumulative aux PMA (Lambert *et al.*, 2016). Des excédents de risque ont aussi été rapportés pour d'autres sites de cancer chez les travailleurs des mines de fer. Ces excédents étaient statistiquement significatifs pour le cancer de l'**estomac** dans trois des quatre pays mentionnant ce cancer; cependant, dans toutes les études, le risque diminue de façon notable avec l'ajustement pour le tabagisme. De plus, aucune association exposition-réponse n'a pu être mise en évidence avec le travail. Quelques études ont rapporté des excès statistiquement significatifs pour certains cancers des **voies aérodigestives** (2 études) et de la **prostate** et de la **vessie** (1 étude) qui disparaissaient après ajustement pour le tabagisme. Finalement, une étude a mentionné une augmentation de l'incidence des cancers de la **peau (non mélanique)** et des **lèvres**, sans association avec la durée d'exposition ou le travail souterrain (Björ, O. *et al.*, 2013).

Quant aux autres maladies respiratoires, seule une étude américaine rapporte un excès d'**anomalies de la plèvre** (plaques pleurales et autres) et une association exposition-réponse statistiquement significative avec l'exposition cumulative aux PMA (Finnegan et Mandel, 2014). Le risque de décès par **silicose** ou **pneumoconiose** a été associé à l'exposition cumulative à la silice cristalline plus qu'avec la durée de travail (1 étude sur 3) et une mortalité par **bronchite chronique** plus élevée a aussi été mentionnée dans deux études.

Tableau 5. Résumé des résultats des études épidémiologiques sur les travailleurs des mines de fer

Pays (nombre d'articles)	Cancer	Maladie pulmonaire non cancéreuse	Exposition associée
États-Unis (n = 5 + rapport)	Poumon (M, I), mésothéliome (M, I), larynx (I), estomac (I)	Anomalies pleurales	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mésothéliome</i> : relation exposition-réponse avec exposition cumulative aux PMA • <i>Autres cancers</i> : association avec tabac, pas avec PMA
République populaire de Chine (n = 5)	<i>Hématite</i> : Poumon (M) <i>Cu-Fe</i> : Poumon (M), foie (M)	Maladies pulmonaires non malignes <i>Cu-Fe</i> : Pneumoconioses	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse avec : poussières totales • Pas de mention de PMA • <i>Cu-Fe</i>: pas de relation exposition-réponse
Suède (n = 8)	Poumon (M, I), estomac (I), peau (I), lèvre (I)	BPOC (M), silicose (M) inflammation (I)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Poumon</i>: relation exposition-réponse avec travail souterrain, exposition cumulative au radon, quartz et émissions de moteurs diesels • Pas de mention de PMA
France (n = 3)	Poumon (M), estomac (M), vessie (M), prostate (M)	Bronchite chronique (M), BPCO (M) fonctions pulmonaires réduites	<ul style="list-style-type: none"> • ↑ risque : travail souterrain ≥ 20 ans; association avec tabac; ↑ après introduction de l'équipement diesel • Pas de mention de PMA
Slovaquie (n = 1)	Poumon (I)	Non rapporté	<ul style="list-style-type: none"> • Tabac, radon, émissions de moteurs diesels • Pas de mention de PMA

BPCO, bronchopneumopathie chronique obstructive (anciennement maladie pulmonaire obstructive chronique ou MPOC); (I), incidence (nouveaux cas); (M), mortalité; PMA, particules minérales allongées; s.p., sans précision

4.2 Expologie/métriologie

La recherche bibliographique a mis en évidence des articles scientifiques ayant analysé des résultats d'exposition des travailleurs à différents cancérogènes ou fibrogènes présents dans la poussière des mines d'or et des mines de fer (incluant les mines de taconite) pour lesquelles des effets sanitaires avaient été rapportés. Les articles recensés décrivent souvent sommairement les mines et les appellations variables de certains emplacements (selon le nom de la compagnie minière ou encore de la ville ou de la région où est située la mine) peuvent porter à confusion.

4.2.1 Données sur les expositions dans les mines d'or

Les mines d'or étudiées sont situées dans différents pays, sous les appellations suivantes : Homestake, près de Lead dans le Dakota du Sud (États-Unis); *Witwatersrand*, près de Johannesburg (Afrique du Sud); *Kalgoorlie* (Australie-Occidentale); *Salsigne*, dans le Languedoc-Roussillon (France); *Xiushui*, dans la province de Jiangxi (Chine); et 43 mines d'or en filon (« Lode Gold »), dans l'est de l'Ontario (Canada). Le tableau 6 présente un résumé des résultats des études d'expologie pour les mines d'or et l'annexe C.I illustre, sous forme de tableau, les informations agglomérées sur la minéralogie, l'exposition potentielle et les données d'exposition de chacune des mines.

4.2.1.1 États-Unis

La majorité des études sur les PMA dans les mines d'or provient de la mine souterraine Homestake, dans le Dakota du Sud, qui a été exploitée presque continuellement depuis 1876. Les roches de cette formation ont subi un métamorphisme moyen et contiennent des amphiboles de la série grunérite-cummingtonite (Caddey, Bachman, Campbell, Reid et Otto, 1991). Deux associations prépondérantes avec le quartz ont été mises en évidence, soit quartz et cummingtonite, et quartz et sidérite (carbonate de fer, FeCO_3). Des expositions potentielles à la silice cristalline, au radon, à l'arsenic et aux PMA ont été rapportées (Lightfoot *et al.*, 2010). Steenland *et al.* (1995b) citent un rapport d'hygiène du NIOSH (Zumwalde, 1981) ayant rapporté la présence d'une quantité non précisée de fibres amiantiformes et non amiantiformes dans les poussières de cette mine au milieu des années 1970 : des PMA non amiantiformes de longueur supérieure à 5 μm ont été identifiées (69 % de cummingtonite-grunérite, 15 % de trémolite-actinolite et 16 % d'autres variétés d'amphiboles). La plupart des PMA observées par microscopie électronique à transmission (MET), environ 70 à 80 %, avaient une longueur inférieure à 5 μm (Zumwalde, Ludwig et Dement, 1981) cité par (Steenland et Brown, 1995b).

Gillam *et al.* (1976) ont rapporté que les fibres aéroportées analysées par MET étaient composées à 80 - 90 % d'amphiboles non amiantiformes dont 60 à 70 % étaient de la grunérite fibreuse, mais en fragments de clivage, 1 à 2 % de la cummingtonite fibreuse et 10 à 15 % de la hornblende fibreuse. De plus, 70 à 80 % des PMA avaient une longueur inférieure à 5 μm . Pour la totalité des fibres, la longueur moyenne géométrique était de 3,2 μm et le diamètre moyen géométrique était de 0,4 μm . Les PMA non amiantiformes de plus de 5 μm se composaient à 69 % de cummingtonite-grunérite (diamètre (d) = 0,43 μm), à 15 % de trémolite-actinolite (d = 0,27 μm) et à 16 % d'autres amphiboles non amiantiformes (Brown, Kaplan, Zumwalde, Kaplowitz et Archer, 1986); Zumwalde, 1981, cité par (Steenland et Brown, 1995b).

La teneur en quartz mesurée dans la poussière déposée était de 39 % tandis que la teneur en arsenic était inférieure à 0,01 %. Les produits de filiation du radon se trouvaient à une concentration < 0,01 x niveau opérationnel¹² (*working level* ou WL) (Gillam *et al.*, 1976).

¹² Le niveau opérationnel (*working level* ou WL) est une mesure de l'énergie potentielle des particules alpha par litre d'air. Un WL de produits de filiation du radon correspond à environ 100 pCi/l de radon gazeux à l'équilibre et libérerait environ 130 000 mégaélectronvolts (MeV) d'énergie alpha en décroissance par litre d'air dans un environnement intérieur typique. Le WLM ou niveau opérationnel-mois correspond à la concentration à laquelle un mineur est exposé durant un mois de travail, soit historiquement à 170 heures.

Les concentrations moyennes des fibres aéroportées de longueur supérieure à 5 µm étaient de 0,25 f/cm³ avec une valeur maximale à 2,8 f/cm³ (n = 200), telles que mesurées par microscopie optique à contraste de phase (MOCP). Parmi ces 200 échantillons, une analyse par MET des 22 échantillons à plus fortes concentrations en fibres totales a révélé des concentrations en fibres supérieures à 5 µm de 0,36 ± 0,08 f/cm³ et en fibres totales (toutes longueurs) de 4,82 ± 0,68 f/cm³. L'analyse par MET a permis de constater qu'environ 94 % de ces fibres étaient inférieures à 5 µm, avec un diamètre médian de 0,13 µm pour une longueur médiane de 1,1 µm (Gillam *et al.*, 1976; NIOSH, 2011). Toutes ces concentrations sont supérieures aux normes de l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) présentement en vigueur (0,1 f/cm³). Les données sur le quartz, qui ne sont pas utilisables directement, indiquent que de nombreux résultats seraient supérieurs aux normes actuelles d'OSHA. La moyenne cumulative d'exposition pour le radon se situe entre 0 et 18 niveau opérationnel-mois par année (WLM/an) et la concentration d'arsenic était inférieure à 5 µg/m³ (Zumwalde *et al.*, 1981), cité par (Steenland et Brown, 1995b).

4.2.1.2 Afrique du Sud

Les articles sur le site des récifs de *Witwatersrand* en Afrique du Sud fournissent des données de surveillance de l'exposition des mineurs aux poussières et au quartz respirables basées sur des centaines d'échantillons (Churchyard *et al.*, 2004; Hnizdo, Baskind et Sluis-Cremer, 1990; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1993). Les caractéristiques minéralogiques sont peu détaillées, mais il est rapporté que la roche mère contenait de 60 à 90 % de quartz (Hnizdo *et al.*, 1997). Les concentrations en poussières respirables étaient de 0,35 ± 0,46 mg/m³ (étendue de 0,05 à 3,71 mg/m³). La teneur en quartz des poussières était de 12 ± 5,6 % (0 – 21,3 %) (Churchyard *et al.*, 2004) selon une étude, et de 30 % selon une autre (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991); la concentration en quartz respirable était de 0,048 ± 0,072 mg/m³ (0 à 0,71 mg/m³) (Churchyard *et al.*, 2004). Le domaine des concentrations étant très large, un questionnement subsiste sur le nombre d'échantillons ou de postes de travail pour lesquels les expositions dépassent les normes actuelles. Le radon a été trouvé à une concentration moyenne de 0,4 WL (0,1 à 3 WL, pour différentes mines) et évalué à une concentration supérieure à 100 WLM pour une durée de travail de plus de 20 ans (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991).

Il n'y a pas de mention de la présence de PMA.

4.2.1.3 Australie

Les articles recensés en épidémiologie ne donnent pas d'informations minéralogiques pour la mine de **Kalgoorlie** en Australie de l'Ouest, tandis que les données d'hygiène du travail se limitent à une mention de la possibilité d'exposition à la silice, au radon et à l'arsenic avec une médiane des concentrations de silice cristalline respirable à 0,43 mg/m³ et une concentration de radon négligeable (Steenland *et al.*, 2001). Cependant, un auteur mentionne que des fibres d'amiante auraient été trouvées dans l'air des mines selon le témoignage verbal d'un hygiéniste du travail dans le contexte d'un rapport d'enquête gouvernemental sur la problématique de l'amiante à Wittenoom (Lee *et al.*, 1999); aucune autre mention de la présence de PMA dans des mines d'or n'a été trouvée. Cependant, le site Internet Mindat rapporte la présence d'actinolite et d'autres amphiboles dans la mine Golden Horseshoe à Kalgoorlie-Boulder (<https://www.mindat.org/loc-272392.html>).

4.2.1.4 France

Pour le site minier de **Salsigne** en France, il n'y a pas d'information sur la géologie et la minéralogie. Les auteurs de l'étude épidémiologique ont identifié comme agresseurs potentiels, l'arsenic (soluble et insoluble), le radon et la silice cristalline. Les données d'exposition pour la silice sont difficiles à interpréter compte tenu du type d'échantillonnage (poussière totale) et de l'absence de précision sur le type de prélèvement (zone respiratoire ou poste ambiant). La teneur moyenne en silice dans la poussière était de $9,58 \pm 2,81$ % pour des niveaux de poussière totale aéroportée qui a elle-même diminué de 611 à 527 particules/ml, entre 1966 et 1984. Dans les années 1980, les niveaux d'exposition pour l'amiante étaient de l'ordre de 0,01 – 0,2 f/ml tandis que les niveaux de radon ont passé de 1000 – 2500 Bq/m³ à 300 Bq/m³ (Simonato *et al.*, 1994).

4.2.1.5 République populaire de Chine

Une seule étude a été réalisée sur la silicose accélérée chez les travailleurs d'une mine d'or, ouverte entre 1987 et 1988 et située dans le comté de Xiushui, à 150 km au nord de Nanchang, la capitale de la province de Jiangxi (Tse *et al.*, 2007). Selon des données d'hygiène du travail extraites de rapports gouvernementaux, des concentrations de poussières totales variant de 102,6 à 159 mg/m³ (moyenne de 130,8 mg/m³) ont été observées chez des foreurs de roc dans les mines souterraines. La fraction de silice cristalline dans la poussière totale se situait autour de 76 %; toutefois, la proportion de silice respirable n'était pas disponible. Tse *et al.* (2007) rapportent que des données sur la poussière en vrac d'une mine d'une autre province (Guangxi) ont révélé que plus de 90 % des poussières avaient un diamètre inférieur à 5 µm. Compte tenu des procédures d'extraction semblables dans ces deux mines d'or, la concentration moyenne de poussières de silice respirables a été estimée à 89,5 mg/m³ (étendue, 70,2 à 108,8 mg/m³ selon ce calcul : concentration de poussière totale x 0,76 x 0,90). Aucune information sur la présence de PMA n'a été fournie dans cet article. Les auteurs mentionnent qu'un procédé à sec était utilisé durant les premiers cinq ans d'opération de la mine souterraine et qu'un simple procédé humide, appliqué par la suite, a permis une suppression limitée de la concentration de poussières. Des masques de coton ont été distribués aux travailleurs, mais n'ont pas été fréquemment portés. Il n'y avait pas de ventilation mécanique ni aucune autre mesure de prévention (Tse *et al.*, 2007).

4.2.1.6 Canada

À l'exception des mines d'or de l'Ontario et du Québec, aucune information sur les expositions potentielles ou les données d'exposition n'a été recensée dans les autres provinces canadiennes.

Ontario

Une description exhaustive des caractéristiques géologiques des sites de *lode gold* (gisement d'or filonien) de l'**Ontario** est disponible. Parmi les 43 mines d'or actives ou abandonnées depuis 1910, la présence de fibres de trémolite (sept mines), d'actinolite (deux mines), d'actinolite/trémolite (une mine) et d'autres amphiboles fibreuses (une mine) a été rapportée, mais aucune donnée de concentration dans l'air n'est disponible (Kusiak, Ritchie, Springer, *et al.*, 1993). Les teneurs moyennes de quartz dans la poussière de sept mines varient de 4,3 - 11,8 %. L'arsenic est présent dans la roche de 17 mines (0,2 - 1,60 %) et également dans les rejets ou débris de 29 mines (0,01 - 1,3 %) et est rapporté être présent à des concentrations

très élevées dans certaines d'entre elles. Le chrome a été mesuré dans la roche de quatre mines et dans les débris des 43 autres. Les concentrations de radon, mesuré depuis les années 1980, variaient en moyenne de 0,003 à 0,174 WL dans les sections actives de 18 mines, de 0,001 - 0,335 WL dans la section inactive de 16 mines et de 0,006 - 0,192 WL dans les puits d'air de 13 mines. L'exposition professionnelle aux produits de filiation du radon est exprimée en niveaux opérationnels-mois (WLM). Ces résultats concordent avec les informations minéralogiques. Les concentrations de poussières ont diminué progressivement entre 1950 et 1967, de 1 000 particules/ml à moins de 200 particules/ml, à la suite de contrôles d'ingénierie (Kusiak *et al.*, 1991). La valeur limite professionnelle proposée maintenant par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH[®]) est de 4 WLM par année (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2018).

Québec

Au Québec, la possibilité d'exposition à la silice cristalline dans cinq mines d'or souterraines des districts de Rouyn-Noranda, de Val-d'Or et de Chibougamau a été explorée dans le contexte d'une thèse doctorale (Gagné, 2000). La minéralogie, la géologie et la structure des roches ont été étudiées afin de soutenir une évaluation éventuelle de l'exposition. La proportion de quartz dans les roches de ces différentes mines variait de 23 à 39 %. Les moyennes d'exposition des travailleurs étaient de 0,50 mg/m³ pour les poussières respirables et de 0,04 mg/m³ pour le quartz respirable, pour une proportion de quartz respirable de 7,8 %. L'auteure ne mentionne pas la présence de PMA dans cette étude (Gagné, 2000).

Un rapport indique que 63 % des résultats d'analyse de quartz (provenant de prélèvements de durées variées) des mines d'or de la région de l'Abitibi-Témiscamingue (2001-2008) et mesurés par les laboratoires de l'IRSST présentaient des concentrations supérieures ou égales à la moitié de la valeur de la norme québécoise (0,1 mg/m³) (Ostiguy, Morin, Bensimon et Baril, 2012).

4.2.1.7 Résumé sur les expositions dans les mines d'or

La très grande majorité des données d'exposition aux PMA provient du site de la mine Homestake aux États-Unis avec quelques données fragmentaires sur l'exposition à l'amiante en France et en Ontario. Les expositions à la silice cristalline ont été analysées ou abordées dans toutes les études épidémiologiques ayant porté sur les travailleurs des mines d'or, alors que des données d'exposition au radon et à l'arsenic ont été rapportées pour les mines des États-Unis, de l'Afrique du Sud et de la France. Les émissions de moteur diesel ne sont mentionnées que dans les études canadiennes.

En Ontario, les informations minéralogiques sont exhaustives, mais les données d'exposition ne couvrent que sommairement les principaux agresseurs potentiels soit les particules minérales allongées, le radon, l'arsenic et la silice cristalline. Au Québec, l'étude de Gagné et le rapport d'Ostiguy évoquent la possibilité de dépassement des valeurs d'exposition admissibles (VEA) de l'époque, pour le quartz et les poussières respirables, sans mentionner les PMA cependant (Gagné, 2000; Ostiguy *et al.*, 2012).

Tableau 6. Résumé des résultats des études d'expologie pour les mines d'or

Pays; mine	Donnée minéralogique	Particule minérale allongée	Autre exposition potentielle
États-Unis; <i>Homestake,</i> <i>Dakota du</i> <i>Sud</i>	Schistes métamorphisés avec filons de quartz, chlorite, amphiboles, sidérite	Amphiboles non amiantiformes ≥ 5 µm : cummingtonite-grunérite, trémolite-actinolite PMA < 5 µm : non précisées	Silice cristalline, radon, arsenic, arsénopyrite
Afrique du Sud; <i>Récifs de</i> <i>Witwatersrand</i>	Roches de quartz et silicates avec petites quantités de pyrite et de métaux lourds, incluant l'uranium	Pas de mention de PMA	Silice cristalline, radon
Australie de l'Ouest; <i>Kalgoorlie</i>	Aucune description géologique ou minéralogique	Présence d'amiante rapportée dans un article (d'après le témoignage d'un hygiéniste du travail lors d'une audience gouvernementale)	Radon, arsenic, silice
France; <i>Salsigne</i>	Aucune description géologique ou minéralogique	Mention d'amiante au milieu des années 1980 (pas de mesures)	Radon, arsenic, silice
République populaire de Chine; <i>Xiushui</i>	Aucune description géologique ou minéralogique	Pas de mention de PMA	Silice
Canada; <i>43 mines,</i> <i>Ontario</i>	Gisements d'or en filon (<i>lode gold</i>), quartz et arsénopyrite Présence de komatiite (roche susceptible de se modifier en amphiboles ou en serpentines)	Présence de trémolite dans 7 mines, d'actinolite dans 2 mines, d'actinolite/trémolite dans 1 mine et d'amphiboles fibreuses dans 1 mine; pas de mesures	Arsenic, silice cristalline, radon, chrome

4.2.2 Données sur l'exposition dans les mines de fer incluant les mines de taconite

La recherche bibliographique a identifié un certain nombre de mines de fer, incluant les mines de taconite, pour lesquelles l'exposition des travailleurs a fait l'objet d'études. Ces sites ferrifères se trouvent principalement aux États-Unis (site Mesabi dans le nord-est du Minnesota), en Chine (Longyan et Taochong), en Suède (Malmberget et Kiruna), en France (le bassin de la Lorraine) et en Slovaquie (districts de Roznava et de Nizna Slana). Le tableau 7 est constitué d'un résumé des résultats des études d'expologie pour les mines de fer et l'annexe C. Il présente sous forme de tableau les informations agglomérées sur la minéralogie, l'exposition potentielle et les données d'exposition de chacune des mines.

4.2.2.1 États-Unis

Dans la région du lac Supérieur au Minnesota, le terme « taconite » est utilisé en particulier pour désigner certaines roches du Mesabi Iron Range de la formation ferrifère Biwabik. Pour des raisons techniques et économiques, ce minerai à plus faible teneur en fer (25 - 30 %) est encore extrait commercialement alors que les mines à prépondérance d'hématite, à forte teneur en fer (50 - 80 %), ont été à peu près épuisées (Allen, 2014).

La plupart des études recensées par la recherche bibliographique réfèrent au Mesabi Iron Range au Minnesota, constitué de quatre zones métamorphiques (figure 3). La minéralogie du site Mesabi, d'une largeur de 4 km et d'une longueur de 200 km, varie de l'est vers l'ouest (McSwiggen et Morey, 2008). Les quatre zones sont constituées de dépôts de taconite accompagnés de quartz, de silicate de fer et de PMA de nature variable, principalement sous forme de fragments de clivage (Jirsa, Miller et Morey, 2008). En raison des différences minéralogiques entre la zone est et la zone ouest, les travailleurs ne seraient pas exposés aux mêmes types de PMA (Allen, 2014). Le minerai exploité dans la zone plus à l'ouest (zone 1), où cinq mines sont en opération, serait composé majoritairement de minéraux non amiantiformes non amphiboles de la famille des phyllosilicates (minnésotaïte, greenalite, chamosite et stilpnomélane). Il n'y aurait pas d'amiante réglementé, pas d'amphiboles, ni de fragments de clivage de longueur supérieure à 5 µm ou de diamètre inférieur à 0,5 µm (Zanko, Niles et Oreskovich, 2008). La zone 2, dans laquelle il n'y a plus de mine en opération, est une aire de transition avec quelques amphiboles tandis que la zone 3, qui n'a jamais été exploitée, est d'une minéralogie différente; de la grunérite sous formes tabulaire et fibreuse y ayant été observée (McSwiggen et Morey, 2008). Le minerai de fer exploité dans la mine de la zone la plus à l'est (zone 4) contiendrait des PMA d'amphiboles riches en fer, principalement de la cummingtonite-grunérite et de l'actinolite (ferroactinolite), ainsi que de la hornblende, dont la majorité ne serait pas amiantiforme (Wilson *et al.*, 2008; Zanko *et al.*, 2008).

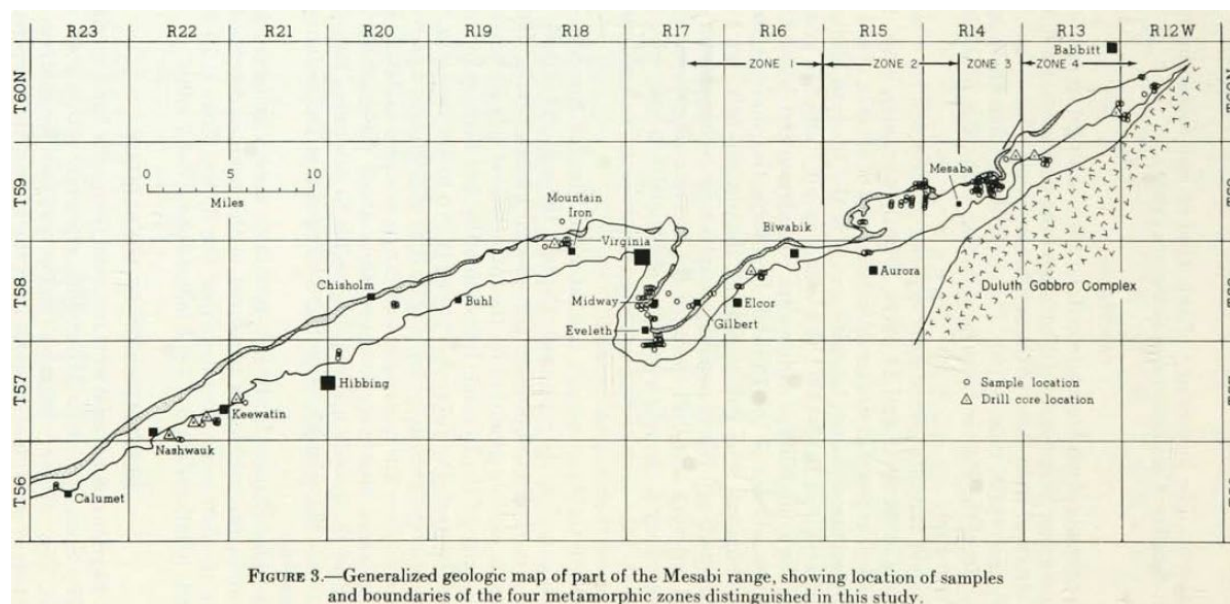


FIGURE 3.—Generalized geologic map of part of the Mesabi range, showing location of samples and boundaries of the four metamorphic zones distinguished in this study.

Figure 3. Chaîne ferrifère du Mesabi (reproduit de French, <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/57071>, p. 15. © 1968, University of Minnesota. Avec permission du Minnesota Geological Survey).

Une importante campagne d'échantillonnage a été réalisée, en 2010-2011, dans six mines de taconite en opération dans les zones est (1 site) et ouest (5 sites) du site Mesabi afin d'évaluer les niveaux d'exposition des travailleurs aux PMA, à la poussière et à la silice respirables et d'estimer les différents paramètres utiles pour les études épidémiologiques (Hwang, Ramachandran, Raynor, Alexander et Mandel, 2013, 2014).

Des mesures personnelles d'exposition aux PMA ont été réalisées auprès des travailleurs effectuant des opérations sur site, répartis en 27 groupes d'exposition similaire (GES) regroupant 180 titres d'emploi provenant de sept services. Les échantillons ont été analysés à l'aide de la MOCP avec la méthode NIOSH 7400 selon laquelle les PMA prises en compte ont une longueur supérieure à 5 µm, un diamètre inférieur à 3 µm et un rapport de longueur/diamètre supérieur à 3. Dix-huit pour cent des échantillons ont été réanalysés par MET selon la méthode NIOSH 7402. Les expositions ont été reconstruites par modélisation, pour chaque GES, en combinant les mesures récentes aux mesures historiques pour les mines en activité de 1955 à 2010. Un niveau cumulé d'exposition a ensuite été calculé pour chaque travailleur à partir de son historique professionnel. Sur la base de ces estimations, les expositions aux PMA auraient été plus élevées durant les premières années de l'industrie de la taconite (Finnegan et Mandel, 2014).

Les résultats de mesure des 1 298 échantillons indiquent que, pour plusieurs GES des différentes mines, les niveaux d'exposition aux PMA totales sont supérieurs à 0,1 f/cm³. Ainsi, les concentrations moyennes de PMA totales varient de 0,009 à 0,341 particule/cm³ dans la zone est et fluctuent de 0,014 à 0,095 particule/cm³ pour la zone ouest. Les résultats d'exposition aux PMA totales sont statistiquement plus élevés dans la zone est que dans la zone ouest pour 13 des 21 GES présents dans les deux zones. Par contre, les concentrations moyennes de PMA amphiboles sont nettement inférieures à celles des PMA totales, variant de < LD¹³ – 0,110 particule/cm³ dans la zone est et sont inférieurs à la LD dans la zone ouest. Dans les deux zones, les moyennes de PMA d'amphiboles les plus élevées se trouvaient lors du concassage du minerai (technicien à l'opération) et de l'entretien (électriciens se déplaçant dans la mine). Ces résultats sont cohérents avec les différences minéralogiques des deux zones et indiquent que les PMA dans le minerai de taconite sont composées majoritairement d'espèces minérales non amphiboles. Toutefois, des PMA d'amphiboles, mais non amiantiformes ont été identifiées dans la zone est du Mesabi Iron Range, mais les niveaux étaient inférieurs à la limite d'exposition recommandée aux États-Unis (0,1 f/cm³, en MOCP), sauf quelques exceptions (Hwang *et al.*, 2013).

Une deuxième étude, conduite par la même équipe de l'Université du Minnesota, a été réalisée dans les six mêmes mines de taconite afin de caractériser la distribution granulométrique des PMA et de développer une méthode de conversion pour les concentrations mesurées selon les critères des méthodes NIOSH 7400/7402 en concentrations définies selon d'autres critères dimensionnels (Hwang *et al.*, 2014). Les échantillons d'air ambiant ont été prélevés à l'aide d'un impacteur à cascade (MOUDI) (diamètre aérodynamique de 36 nm à 56 µm). Les mesures et les comptages des PMA ont été réalisés par MOCP et MET selon différentes définitions relatives aux dimensions¹⁴ :

¹³ LD = limite de détection < 0,0001 particules/cm³.

¹⁴ L = longueur, D = diamètre et L/D = rapport longueur/diamètre.

- Fragments de clivage : $L/D \leq 20$;
- PMA courtes ou PMA Suzuki : $L \leq 5 \mu\text{m}$ et $D \leq 0,25 \mu\text{m}$;
- PMA NIOSH¹⁵ : $L > 5 \mu\text{m}$; $L/D \geq 3$;
- PMA Chatfield : $0,04 \mu\text{m} < D < 1,5 \mu\text{m}$ et $20 < L/D < 1000$.

Les concentrations les plus élevées pour les PMA, totales et d'amphiboles, ont été observées pour la fraction fragments de clivage (MET) suivies de la fraction fibres courtes (MOCP et MET). Les PMA dont la longueur variait de 1 à 3 μm et le diamètre de 0,2 à 0,5 μm étaient prépondérantes. La plupart des PMA, étant plus courtes que 5 μm et plus fines que 1 μm , ne sont pas prises en compte par la méthode NIOSH qui a donné des concentrations beaucoup plus faibles.

Les concentrations de PMA totales sont plus élevées dans la zone est que dans la zone ouest, tandis que les PMA d'amphiboles ne sont observées que dans la zone est (à l'exception d'un seul échantillon à un poste de la zone ouest), ce qui est conséquent avec les différences géologiques entre les zones. Par contre, la proportion de fragments de clivage parmi les PMA totales est plus élevée dans la zone ouest. Les concentrations de fragments de clivage sont plus élevées dans les procédés d'extraction, en raison de la génération accrue de PMA lors de telles activités. Certaines de ces PMA peuvent correspondre à la définition de fibre réglementaire ($L > 5 \mu\text{m}$ et $L/D > 3$), même si elles ne sont pas amiantiformes (Hwang *et al.*, 2014).

Des mesures d'empoussièrement avaient été réalisées en 1974-1975, dans une industrie de traitement du minerai de taconite de la région de Silver Bay, sur le bord du lac Supérieur. Ce minerai provenait d'une mine située dans la zone est et l'usine avait été investiguée pour ses rejets dans l'eau (7,5 millions de fibres par litre) et ses émissions de particules fibreuses ($L/D > 3$) en ambiance, déterminés par la méthode indirecte par MET (0,0003 à 0,03 f/cm^3). D'autres mesures réalisées ultérieurement révèlent des concentrations moyennes de 0,0626 f/cm^3 (intervalle de confiance à 95 % [IC 95 %] 0,035 - 0,9 f/cm^3). Entre 1990 et 2001, les concentrations moyennes de particules fibreuses d'amphiboles étaient de 0,0022 f/cm^3 (0,0001 à 0,0140 f/cm^3) (Axten et Foster, 2008). Les concentrations moyennes de grunérite fibreuse ont diminué de 0,048 à 0,0088 f/cm^3 entre 1990 et 1998. Durant la même période, les concentrations de PMA de la série trémolite-actinolite fibreuse ont également diminué de 0,0186 à 0,0029 f/cm^3 . La majorité des particules comptées serait des fragments de clivage. Parmi les particules fibreuses présentes dans l'air, 10 % auraient une longueur supérieure à 5 μm et moins de 1 % serait amiantiforme ou fibreuse (hornblende, cummingtonite-grunérite et trémolite-actinolite) (Allen, 2014; Axten et Foster, 2008). Parmi les fibres aéroportées, environ 80 % étaient de composition cohérente avec la grunérite (80 %) et 20 %, avec la trémolite-actinolite (Wilson *et al.*, 2008).

Une veine de grunérite amiantiforme (amosite) a été décrite dans une zone relativement petite d'une mine du site Mesabi (Nolan, Langer, Wilson et Smith, 1999). Les veines de grunérite atteignent jusqu'à trois pieds d'épaisseur. La concentration moyenne de fibres ($\geq 5 \mu\text{m}$), pour 179 échantillons personnels, mesurée par MET selon la méthode 7402 de NIOSH, était de 0,05 f/ml , avec un maximum à 0,39 f/ml . Treize pour cent des résultats étaient supérieurs à 0,1 f/ml . Les échantillons personnels étaient représentatifs d'emplois spécifiques durant les

¹⁵ Fibre NIOSH ou fibre réglementaire.

opérations normales dans la zone de l'affleurement de grunérite amiantiforme. Les particules fibreuses incluaient les fragments de clivage allongés et étaient similaires aux objets rapportés pour la mine Reserve Mining.

Mesures d'exposition à la silice cristalline

Des données d'exposition à la Reserve Mining ont montré des concentrations de poussières respirables de 0,02 à 2,75 mg/m³ (étendue modale de 0,2 à 0,6 mg/m³). La concentration cumulative de silice cristalline a été aussi élevée que 1000 mg/m³-année. La teneur en quartz dans la poussière de deux autres mines était de 28 à 40 % (mine Erie) et de 20 % (mine Minntac) (Nolan *et al.*, 1999).

Des échantillons personnels (n = 679) avaient également été recueillis dans le but d'évaluer les niveaux d'exposition actuels (2010-2011) aux poussières et à la silice respirables des travailleurs des six mines de taconite du Mesabi Iron Range, répartis en 28 GES regroupant 181 titres d'emploi provenant de sept services. Les concentrations de poussière et de silice respirables ont été mesurées à l'aide des méthodes NIOSH 0600 et NIOSH 7500, respectivement. Les concentrations de poussières respirables dans toutes les mines étaient bien inférieures au TLV® de l'ACGIH (3 mg/m³) tandis que les expositions à la silice respirable montraient plusieurs dépassements de la TLV® (0,025 mg/m³). Toutes les mines avaient des GES dont les expositions moyennes pondérées dépassaient la TLV®. Les concentrations de silice respirable les plus élevées étaient généralement observées dans le service du broyage dans toutes les mines. Bien que les différences géologiques entre les zones fussent manifestes sur le plan des expositions aux PMA, très peu de variabilité dans l'exposition aux poussières et à la silice respirables a été observée entre les mines de l'est et de l'ouest, les procédés étant similaires dans toutes les zones étudiées. Le pourcentage de silice dans la poussière était approximativement de 14 % dans toutes les mines (Hwang, 2013).

Les concentrations de quartz avaient aussi été documentées dans le cadre d'une reconstruction historique de l'exposition des travailleurs sur 30 ans, dans quatre mines de taconite du Mesabi Iron Range (Sheehy et McJilton, 1990). La teneur en quartz dans ces mines variait de 14 à 37 % entre les départements, étant beaucoup plus faible dans le département de bouletage (2 à 5 %). Des concentrations de 0,18 - 0,61 mg/m³ (moyennes géométriques) ont été observées pour 10 titres d'emploi. Plusieurs de ces résultats dépassaient les normes de l'époque (1990), qui étaient alors de 0,14 – 0,15 mg/m³ (limites d'exposition recommandées (REL) de NIOSH) et de 0,25 – 0,28 mg/m³ (limites d'exposition permises (PEL) de OSHA) en excluant les résultats des préposés aux fournaies et des ouvriers aux billes pour qui les normes étaient plus élevées, respectivement de 1,00 mg/m³ (REL) et de 1,43 mg/m³ (PEL)¹⁶. Soulignons que la norme actuelle de l'ACGIH est de 0,025 mg/m³ tandis que la valeur d'exposition admissible québécoise est de 0,1 mg/m³.

4.2.2.2 République populaire de Chine

Deux mines d'hématite (mine Longyan dans la province de Hebei et mine Taochong dans la province d'Anhui), ouvertes respectivement en 1917 et 1947, ont fait l'objet de publications sur l'exposition aux poussières totales (Chen, S. Y. *et al.*, 1990; Chen, S. Y. *et al.*, 1989). Il est difficile d'interpréter ces résultats, les détails de l'échantillonnage n'étant pas précisés. Ces

¹⁶ Les normes américaines étaient calculées en tenant compte du pourcentage de quartz dans la poussière.

publications ne mentionnent pas la présence de PMA. La localisation exacte de ces mines de même que leur minéralogie ne sont pas documentées. Cependant, un article mentionne la présence d'actinolite dans un des minerais d'hématite de Taochong, sans que des mesures ne soient présentées (Cao *et al.*, 2016). Des mesures de benzo(a)pyrène, un cancérogène avéré chez l'humain, de radon et de ses produits de filiation, de même que de poussières totales et de plusieurs métaux étaient effectuées par les compagnies (Chen, S. Y. *et al.*, 1990). L'introduction de ventilation mécanique et de procédés humides ont permis de réduire les concentrations moyennes en poussières totales, mesurées par gravimétrie, de plusieurs centaines de mg/m^3 avant 1963, à moins de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$. À la mine Longyan, entre 1971 et 1979, des concentrations moyennes de $3,8 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($1,8 - 9,2 \text{ mg}/\text{m}^3$; $n = 4655$) ont été mesurées en poussières totales pour les mineurs et les foreurs tandis que des concentrations moyennes de $2,7 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($1,2 - 3,0 \text{ mg}/\text{m}^3$; $n = 167$) ont été trouvées pour les opérateurs de chargeuse mécanique.

La concentration de benzo(a)pyrène était généralement faible dans les mines, avec des résultats occasionnellement au-delà de la concentration maximale permise de $0,15 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, soit $0,08 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0,015 \text{ à } 0,36 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $n = 6$) à Taochong et $0,03 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0,007 \text{ à } 0,16 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; $n = 7$) à Longyan. La concentration d'arsenic et de divers autres métaux dans la poussière déposée était inférieure à 0,01 %. Les concentrations de radon ont particulièrement intéressé les auteurs qui ont rapporté, pour les sites souterrains, une dose annuelle effective de 31 millisieverts (mSv) à Longyan et de 30 mSv à Taochong. La valeur limite chinoise d'exposition en milieu de travail était alors de 50 mSv (Chen, S. Y. *et al.*, 1990).

Un article plus récent sur des mineurs de fer-cuivre souligne que bien que l'exposition cumulative moyenne de silice, d'arsenic, d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et de radon de ces travailleurs soit négligeable, l'exposition maximale peut être très élevée. En effet, les médianes d'exposition pour l'arsenic étaient de $0,1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-année}$ ($0 - 3,1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-année}$), pour les HAP de $26,7 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-année}$ ($0 - 2000 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3\text{-année}$) et pour le radon (produits de filiation), les niveaux opérationnels-mois (WLM) étaient de 0,2 WLM ($0 - 311,4 \text{ WLM}$)¹⁷. La médiane pour la silice respirable se situait à $0,2 \text{ mg}/\text{m}^3\text{-année}$ ($0 - 6,8 \text{ mg}/\text{m}^3\text{-année}$) (Chen, W. *et al.*, 2007).

4.2.2.3 Suède

Les plus grosses mines de fer souterraines dans le monde, Malmberget et Kiruna, sont situées dans le nord de la Suède, à environ 60 km l'une de l'autre. Elles sont en opération depuis plus de 100 ans. La mine de fer Malmberget à Gällivare, exploitée principalement en souterrain depuis 1923, comprend 20 gisements répartis sur une zone souterraine de 5 km par 2,5 km, dont 10 gisements sont en exploitation. Le minerai de Malmberget est composé principalement de magnétite, bien que certaines zones contiennent des quantités significatives d'hématite¹⁸. Le gisement de Kiruna, avec une longueur de 4 km, une largeur de 80 mètres et une profondeur de 2 km, est le plus large au monde. Ses mines ont opéré en surface jusqu'à la fin des années 1950 et sont devenues complètement souterraines en 1965 (Bergdahl *et al.*, 2010). Le minerai de Kiruna est composé principalement de magnétite (60 % de fer)¹⁹.

¹⁷ Un niveau opérationnel (working level ou WL) équivaut à une exposition moyenne de $800 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ou de $20 \text{ pCi}/\text{L}$. Un niveau opérationnel-mois correspond à une exposition à une concentration moyenne de 1 WL pendant 170 heures de travail (http://www.cchst.ca/oshanswers/phys_agents/radon.html).

¹⁸ <http://www.mining-technology.com/projects/malmberget>

¹⁹ <http://www.mining-technology.com/projects/kiruna>

L'exposition aux poussières respirables et au quartz a été mesurée dans les deux mines par des méthodes gravimétriques depuis 1965. Les mesures personnelles ont été réalisées en utilisant des cyclones avec un point de coupure de 5 µm. Les échantillons de poussières respirables prélevés généralement sur 4 heures à l'intérieur d'un quart de travail ont révélé une teneur moyenne en quartz (estimée par diffraction des rayons X) de 2,5 % (étendue de 2,0 à 3,0 %, n = 3122). Les titres d'emploi ayant les expositions moyennes au **quartz respirable** les plus élevées étaient ceux de foreurs (avant 1973 : 0,21 mg/m³ de quartz; 1973-1999 : 0,02 mg/m³), d'opérateurs de chargeuse (av. 1973 : 0,35 mg/m³; 1973-1999 : 0,02 mg/m³), d'opérateurs qui projettent le béton sur les murs et plafonds (av. 1973 : 0,19 mg/m³; 1973-1999 : 0,02 mg/m³) et d'opérateurs de porte de la goulotte (av. 1973 : 1,00 mg/m³; 1973-1999 : 0,06 mg/m³). Une diminution importante de la concentration de poussières a été observée lorsque le forage humide a été introduit dans les années 1930 et encore plus lorsque le mouillage des roches dynamitées a commencé dans les années 1950 (Bergdahl *et al.*, 2010; Hedlund *et al.*, 2008).

Un total de 1981 échantillons personnels de **poussières respirables** a été prélevé entre 1968 et 1995 dans les deux mines. Le niveau quotidien moyen entre 1968 et 1973 a varié de 0,1 à 25 mg/m³ (moyenne arithmétique de 5,9 mg/m³ et moyenne géométrique de 3,0 mg/m³) pour différentes catégories d'emploi. Entre 1974 et 1995, les niveaux moyens de poussières respirables pour les différentes catégories d'emploi ont varié entre 0,3 et 3,0 mg/m³ (moyenne arithmétique de 0,8 mg/m³ et moyenne géométrique de 0,5 mg/m³). La diminution des concentrations de poussières respirables serait due à l'introduction de ventilation mécanique et à l'utilisation de camions avec cabines ventilées, après 1973 (Björ, B. *et al.*, 2010).

Selon Bergdahl *et al.*, (2010), les mines de Kiruna et de Malmberget sont assez similaires, à l'exception de la présence de radon (même compagnie, avec des techniques et des équipements similaires, opérées durant la même période). Cependant, la mine de Kiruna a présenté, historiquement, des niveaux de radon plus faibles que celle de Malmberget, où le contenu en uranium dans la roche est plus élevé : avant 1960, 380 Bq/m³ puis une augmentation jusqu'à environ 1904 Bq/m³ entre 1970 et 1973. Les données pour la mine de Malmberget montrent des concentrations entre 2500 et 4000 Bq/m³ avant 1974 (Jonsson *et al.*, 2010). Par contre, d'autres expositions telles que les émissions de moteur diesel et les poussières de quartz étaient non négligeables.

Aucun des articles consultés ne fait mention de la présence de PMA dans les mines de la Suède.

4.2.2.4 France

Dans le bassin de Lorraine, une étude a identifié la poussière de mine, les émissions de moteur diesel et les explosifs comme des expositions potentielles dans les mines de fer. Selon les auteurs, le radon ne représente qu'une possibilité minime de risque; cependant, ils ne fournissent aucun renseignement de nature minéralogique et aucune donnée d'exposition (Chau *et al.*, 1993). Dans un autre article, le même groupe de chercheurs a rapporté pour les mines de fer de Lorraine des concentrations de 0,5 à 18 mg/m³ en poussières totales et de 0,1 à 2,5 mg/m³ pour des poussières ≤ 5 µm. La teneur en quartz de la poussière totale variait de 2 à 21 % (Pham, Q. T. *et al.*, 1992).

Aucune de ces études ne fait mention de PMA.

4.2.2.5 Slovaquie

Des mines de fer sont en opération à Roznava et à Nizna Slana dans l'est de la Slovaquie, à 10 km de distance l'une de l'autre. Des données d'exposition aux radiations ionisantes et aux poussières sont disponibles pour la période 1980-1989. Les niveaux moyens de radiation provenant du radon et de ses produits de filiation étaient de 0,13 WL dans la mine de Roznava et de 0,091 WL dans la mine de Nizna Slana. Les concentrations moyennes de poussière totale dans les deux mines étaient semblables (2,4 – 2,6 mg/m³). Durant les opérations de forage, les concentrations de poussières étaient d'environ 15 mg/m³. Les composés principaux du minerai des deux mines sont similaires (oxydes de fer, manganèse, magnésium, calcium, phosphore, arsenic, silice, soufre et carbone) (Isco et al., 1994). Une autre différence d'exposition entre les deux mines était la présence de machinerie à moteurs diesels à Nizna Slana alors que la mine de Roznava n'a utilisé que de la machinerie électrique; aucune mesure d'émissions de moteurs diesels n'a été rapportée cependant. Aucune mention des expositions à la silice cristalline respirable ou de la présence de PMA n'est rapportée dans cette publication (Isco et al., 1994).

4.2.2.6 Canada

Depuis 1990, aucune publication scientifique n'a été répertoriée ni sur l'exposition à des agents cancérogènes ou fibrogènes ni sur les effets à la santé des travailleurs des mines de fer québécois et canadiens.

4.2.2.7 Résumé sur les expositions dans les mines de fer

Les données d'exposition aux PMA dans les mines de fer proviennent uniquement du site de taconite du Mesabi Iron Range, aux États-Unis. Les PMA retrouvées, non amphiboles et non amiantiformes, se présentent majoritairement en fragments de clivage et en fibres courtes (< 5 µm). Pour plusieurs titres d'emploi, les niveaux d'expositions sont supérieurs à 0,1 fibre/cm³.

Les expositions aux poussières et à la silice respirables sont documentées dans les études pour les mines des États-Unis, de la Chine, de la Suède et sont brièvement abordées pour la France et la Slovaquie. Des dépassements des valeurs d'expositions permises sont fréquents et parfois très importants pour la silice cristalline. Des données d'exposition au radon et à l'arsenic ont été rapportées pour les mines de la Chine, de la Suède et de la Slovaquie. Les émissions de moteurs diesels ont été mentionnées par les études française et slovaque alors que l'étude chinoise a aussi considéré l'exposition aux hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Aucune donnée n'a été trouvée pour les mines de fer du Canada.

Tableau 7. Résumé des résultats des études d'expologie pour les mines de fer

Pays; mine	Données minéralogiques	Particule minérale allongée	Autre exposition potentielle
États-Unis; <i>Mesabi Iron Range, Minnesota</i>	Dépôt de taconite avec quartz , silicates de fer, magnétite, amphiboles non amiantiformes (cummingtonite-grunérite, actinolite et hornblende, riébeckite, ferroactinolite fibreuse , sepiolite) Amiante grunérite confiné aux veines de quartz-ankérite-grunérite de la roche hôte	Amphiboles non amiantiformes > 0,25 µm : grunérite + actinolite Fragments de clivage avec L:D moyen = 5,5:1,2 µm. Fragments de clivage > fibres courtes Zone ouest : pas d'amiante réglementé, pas d'amphiboles, ni de fragments de clivage de longueur supérieure à 5 µm ou de diamètre inférieur à 0,5 µm	Silice, quartz, poussières respirables
République populaire de Chine; <i>Longyan (prov. Hebei) et Taochong (prov. d'Anhui)</i>	<i>Taochong</i> : deux types de minerai. Type 1 : hématite, magnétite, quartz, calcite. Type 2 : hématite, grenat, pyroxène, actinolite, chlorite, quartz, calcite	Pas de mention de PMA dans les articles en épidémiologie ou en expologie)	Benzo(a)pyrène, radon et produits de filiation du radon, poussières totales et plusieurs métaux
Suède; <i>Malmberget; Kiruna</i>	Magnétite avec de petites quantités d'hématite, uranium magnétite (Fe ₃ O ₄) avec de petites quantités d'apatite (6 %).	Pas de mention de PMA	Radon, émissions de moteurs diesels, quartz
France; <i>Bassin de la Lorraine</i>	Minerai pauvre en fer, silice, alumine, chaux et anhydride phosphorique	Pas de mention de PMA	Poussière totale, émissions de moteurs diesels et d'explosifs, radon
Slovaquie; <i>Roznava et Nizna Slana</i>	Pas de données trouvées	Pas de mention de PMA	Radiation alpha, poussières totales, machinerie diesel

4.3 Géologie/minéralogie

4.3.1 Revue de la littérature

4.3.1.1 Gîtes aurifères

Au Canada, la grande majorité des mines d'or sont situées dans les ceintures de roches vertes qui sont constituées d'un important volume de roches volcaniques mafiques, souvent métamorphosées au faciès des schistes verts (Eckstrand, Sinclair et Thorpe, 1995). Les

minéraux métamorphiques typiques de ce faciès incluent l'actinolite et, dans une moindre mesure, l'anthophyllite (Powell, W.G. *et al.*, 1993), deux espèces qui, sous leur forme fibreuse, sont considérées comme de l'amiante dans la réglementation québécoise. De plus, la plupart des mines et gisements québécois sont localisés le long d'une faille majeure, nommée Cadillac (Eckstrand *et al.*, 1995), qui pourrait avoir donné à l'actinolite une forme amiantiforme. Les épontes (roches hôtes) des gisements d'or, en Ontario et au Québec, sont donc susceptibles de contenir des PMA.

4.3.1.2 Genèse des formations de fer

Les formations de fer se sont formées dans deux environnements géologiques différents. Celles formées près des fumerolles hydrothermales dans les fonds océaniques sont du type « Algoma », alors que celles formées sur les marges continentales sont du type « Lac Supérieur ». Ces dernières sont les plus abondantes à travers le monde et représentent près de 90 % des réserves et de la production mondiales de fer (Jébrak et Marcoux, 2008). Au Protérozoïque (période géologique s'étalant de 542 à 2500 millions d'années (Ma) dans le passé), le craton du Supérieur (masse continentale incluant une partie de l'entité géographique nommée « Bouclier canadien ») était entouré de marges continentales (figure 4), telles celles que l'on trouve au pourtour de l'océan Atlantique aujourd'hui, sur lesquelles ont précipité des formations de fer rubanées vers 1880 Ma. Cette époque était caractérisée par une activité volcanique particulièrement intense et par l'oxydation massive de l'atmosphère. La remontée du fer (Fe^{2+}) et du silicium (Si) émis par les volcans sous-marins a amené une large quantité de fer qui a précipité au front d'oxydoréduction sur les marges continentales (Pufahl, Anderson et Hiatt, 2014). Les amphiboles de la série cummingtonite-grunérite sont les principaux minéraux métamorphiques des formations de fer et se forment lors d'un métamorphisme moyen (entre 350 et 650°C) des faciès des schistes verts à amphibolite inférieure (Klein, 2005). La plupart des mines et projets miniers québécois sont associés aux formations de fer de la Fosse du Labrador qui s'étend sur un axe nord-sud de Kuujuaq à Fermont (Clark, 1994). Puisque les formations de fer à l'extrême nord et à l'extrême sud de la Fosse ont subi un métamorphisme moyen, il est fort probable qu'on y trouve les amphiboles de la série cummingtonite-grunérite.

4.3.1.3 Contextes géologiques des régions minières du Dakota, du Minnesota, du Québec et du Nuvavut

D'après les études disponibles sur l'état de santé des mineurs d'or et de fer à travers le monde, les contextes géologiques de deux régions minières américaines présentent un intérêt particulier de par la présence rapportée de PMA dans l'air ou le sol de ces mines.

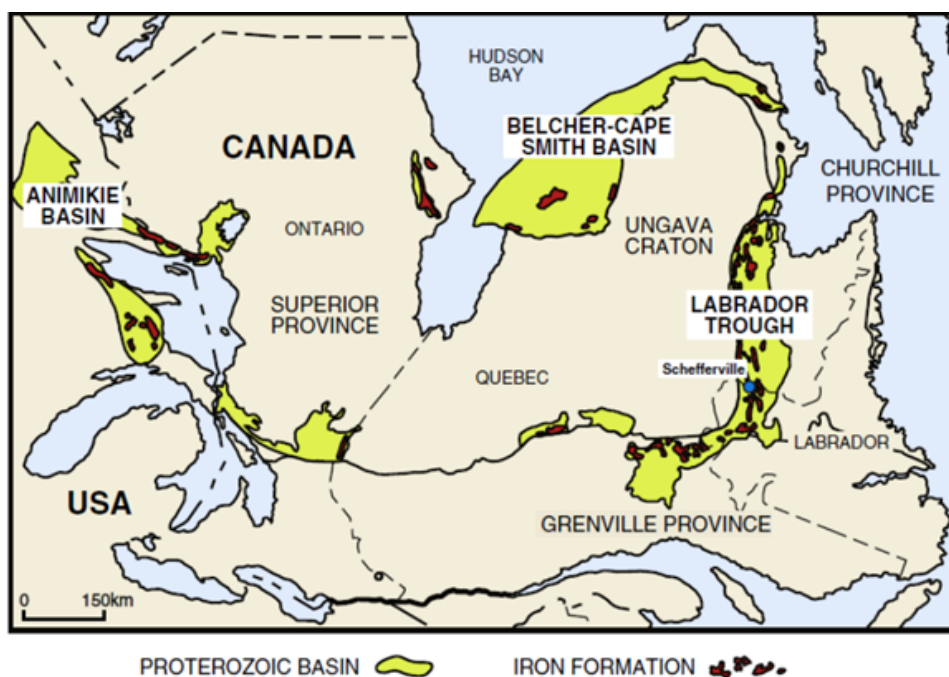


Figure 4. Distribution des formations de fer d'âge ~1880 Ma sur les marges continentales du craton du Supérieur (reproduit de *Sedimentary Geology*, vol. 309, Pufhal et al., « Dynamic sedimentation of Paleoproterozoic continental margin iron formation, Labrador Trough, Canada: Paleoenvironments and sequence stratigraphy », p. 50, © 2014, avec permission d'Elsevier).

Mine d'or Homestake

La mine d'or Homestake dans le Dakota du Sud (États-Unis) est située dans la formation de fer du même nom (figure 5). Au contraire des formations de fer du Minnesota, elle s'est formée sur la marge continentale d'un autre craton, le Wyoming, entre 2020 et 1970 millions d'années (Ma). Par la suite, ce craton est entré en collision avec celui du Supérieur entre 1780 et 1710 Ma pour terminer l'événement Trans-hudsonien (Kilian, Chamberlain, Evans, Bleeker et Cousens, 2016). Lors de cette collision, la formation de fer a été métamorphisée à un degré de métamorphisme moyen, développant ainsi de la grunérite formant 38 à 78 % du volume des six échantillons décrits dans Caddey *et al.* (1991). L'or s'est mis en place tardivement à cet événement de collision et se trouve dans des veines de quartz-sulfure recoupant les strates et les structures. Ainsi, la grunérite n'est pas nécessairement associée au minerai à la mine Homestake.

Mines de fer du Minnesota

Les mines de fer du « Mesabi Iron Range » au Minnesota sont situées dans la formation de fer de Biwabik qui s'est formée dans le bassin d'Animikie vers 1880 Ma sur la marge continentale du craton du Supérieur. Le Complexe de Duluth est un pluton mafique qui s'est introduit dans le bassin d'Animikie vers 1100 Ma. L'intrusion de ces magmas très chauds (1000-1200°C) a permis le métamorphisme de la formation de fer et la formation de PMA d'amphiboles. Le pluton a créé une auréole de métamorphisme dans les roches du bassin, dont la formation de fer de Biwabik.

Le degré de métamorphisme augmentant vers le pluton, on distingue quatre zones de métamorphismes différents dans la Formation de Biwabik (figure 6). La zone 1 est la zone la plus éloignée du complexe Duluth. Elle n'est pas métamorphisée et contient des minéraux tels que quartz, magnétite, hématite, sidérite, ankérite et talc ainsi que des minéraux ferro-silicatés (chamosite, greenalite, minnesotaite et stilpnomélane). La zone 2 est une zone transitionnelle. Elle se compose principalement des mêmes minéraux que la zone 1, mais présente des traces de recristallisation importante. La principale caractéristique qui différencie ces deux zones est la transformation de l'hématite en magnétite ainsi que l'apparition de clinozôisite, un silicate (McSwiggen et Morey, 2008). La zone 3 se caractérise par un métamorphisme modéré. Elle se situe à environ 3,7 km du contact avec le Complexe de Duluth. On y remarque l'apparition de grunérite et de cummingtonite (McSwiggen et Morey, 2008). La zone 4 est complètement recristallisée et se compose de quartz et d'amphiboles ferreuses tels que grunérite, cummingtonite et hornblende (Jirsa *et al.*, 2008). Les PMA d'amphiboles que sont la grunérite et la cummingtonite se trouvent donc directement dans le minerai de fer des zones 3 et 4 près du pluton.

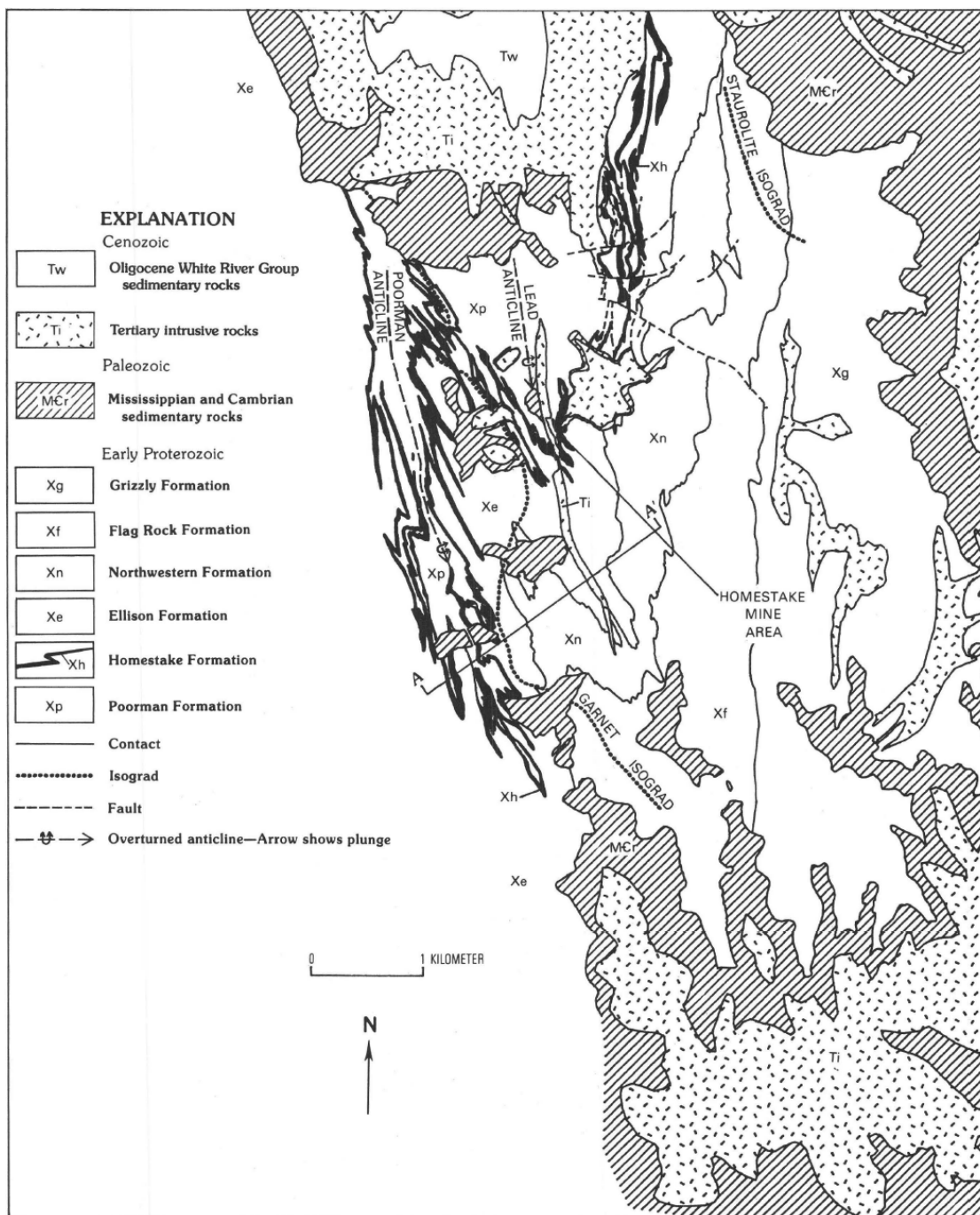


Figure 5. Carte géologique de la région de la mine Homestake (reproduit de U.S. Geological Survey Bulletin, No 1857, Caddey *et al.*, « The Homestake gold mine, an early Proterozoic iron-formation-hosted gold deposit, Lawrence County, South Dakota », p. J7, © 1991, avec permission du US Geological Survey).

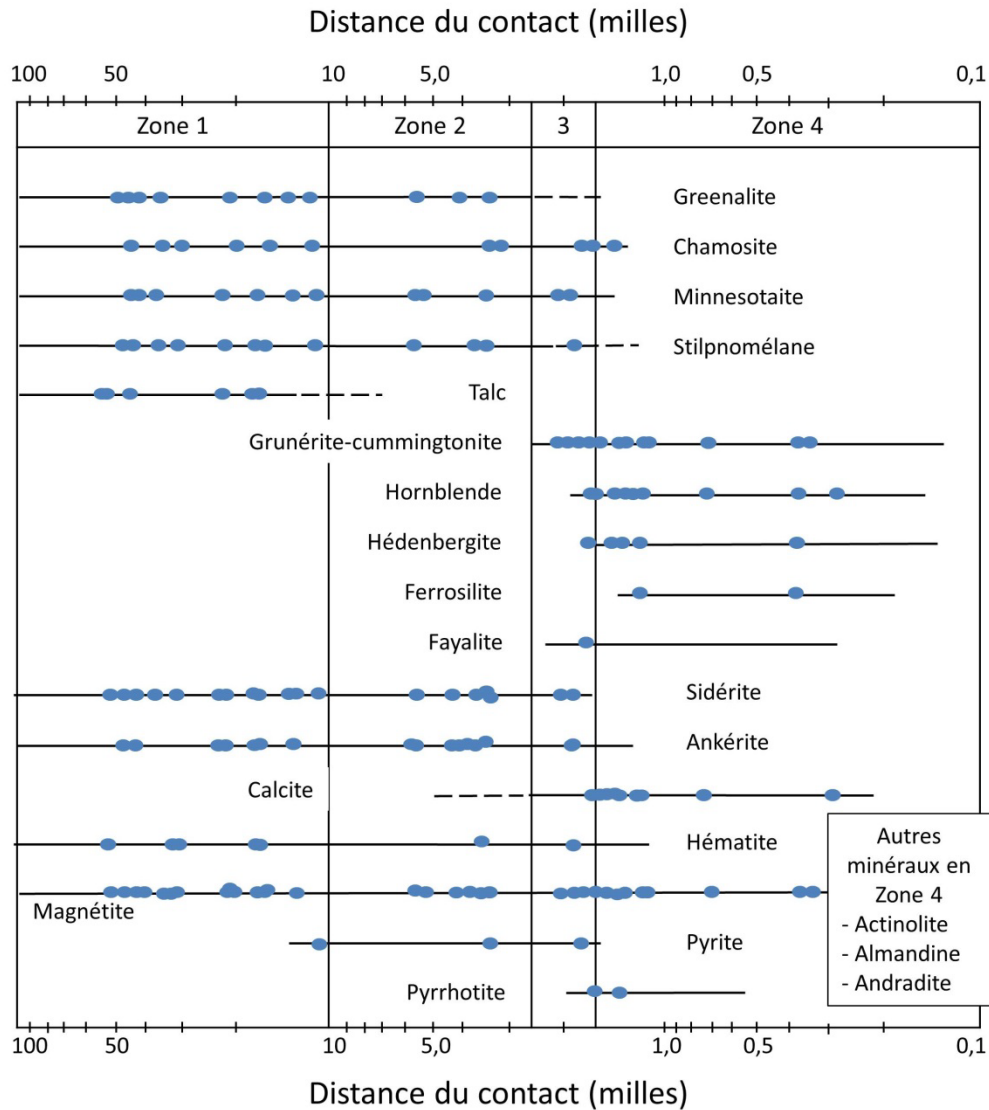


Figure 6. Distribution spatiale des assemblages minéralogiques dans la formation de fer selon la distance du contact avec le Complexe de Duluth (adapté de McSwiggen et Morey, 2008, figure 21).

Mines d'or québécoises

Le contexte géologique des mines d'or québécoises est différent de celui de la mine d'or Homestake puisqu'elles se situent dans une ceinture de roches vertes archéenne (> 2500 Ma) et non dans des formations de fer (Bleeker, 2015). Cette ceinture est composée de niveaux kilométriques de roches volcaniques intercalées de sédiments et entourées de plutons granitiques (figure 7). La minéralisation s'est déroulée de manière synchrone et postérieure au volcanisme. Un premier type de gisement est associé à des sulfures massifs volcanogènes. Un deuxième type de gisement est associé à des filons de quartz-carbonates aurifères. Ces filons occupent les zones de cisaillement, les failles, les zones de stockwerk - minéralisation composée d'un réseau très dense de petits filons (Foucault *et al.*, 2014), les fractures

d'extension ou les plis. Ainsi la plupart des gisements de l'Abitibi sont localisés le long du système de failles Larder Lake-Cadillac (CLFZ sur la figure 7).

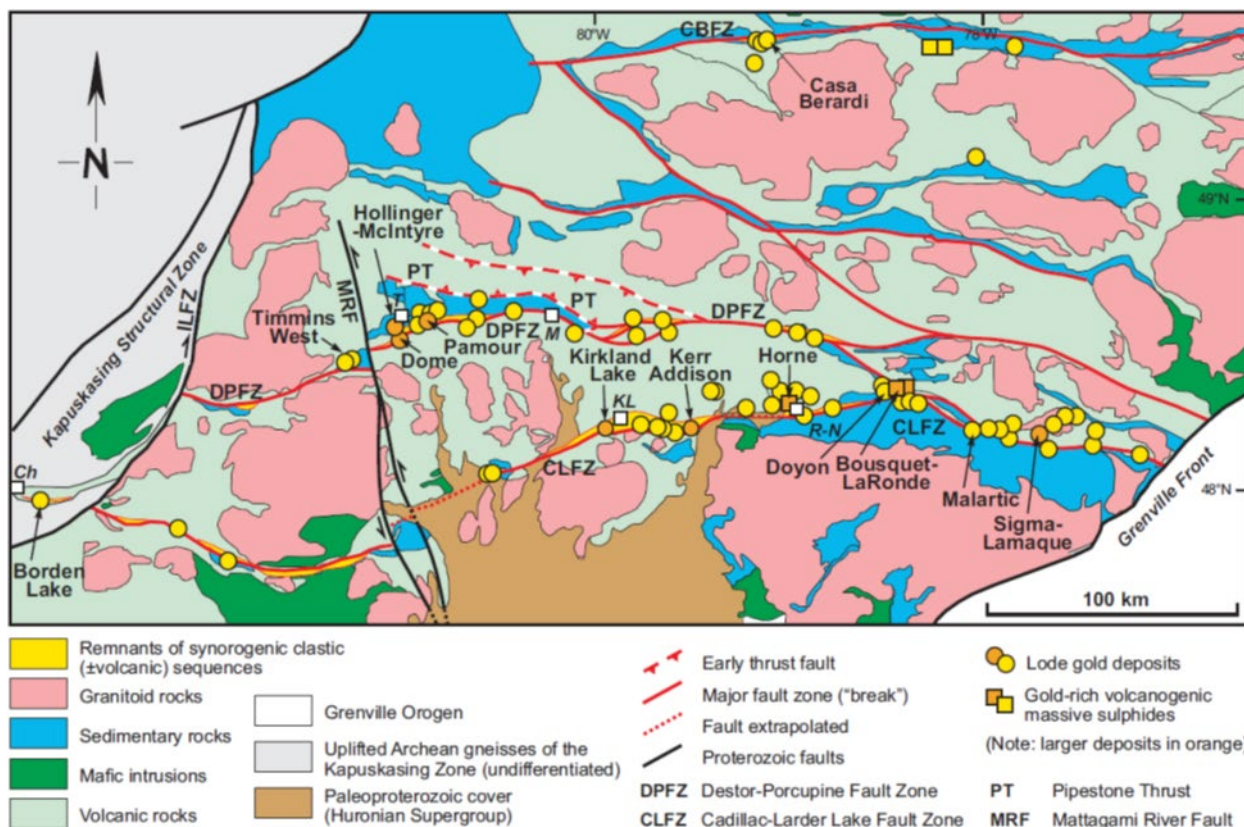


Figure 7. Carte géologique de l'Abitibi montrant la distribution des gisements d'or(reproduit de Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration, Dubé et Mercier-Langevin (éd.). Bleeker W, « Synorogenic gold mineralization in granite-greenstone terranes: the deep connection between extension, major faults, synorogenic clastic basins, magmatism, thrust inversion, and long-term preservation », p. 29, 2015. © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, avec permission de la Commission géologique du Canada).

En général, les roches de l'Abitibi ont été métamorphosées au faciès de schiste vert (« greenschist » en anglais et sur la figure 8). Ces roches métamorphosées sont les plus susceptibles de contenir des PMA d'amphiboles comme la trémolite et l'actinolite. Powell *et al.* (1993) ont déterminé que la température du métamorphisme a atteint 250°C et la pression 220 MPa dans la région de Rouyn-Noranda. Ces auteurs montrent que l'assemblage de minéraux près de Rouyn-Noranda et de la faille Cadillac-Larder Lake comprend des amphiboles et des pyroxènes transformées en actinolite qui peuvent se présenter sous forme d'aiguille ou sous forme lamellaire, lorsque le degré de métamorphisme augmente (Powell, W.G. , Carmichael et Hodgson, 1995). Par contre, puisque la plupart des gisements d'or sont associés à des veines de quartz-carbonate recoupant tous les types de roches, les PMA d'amphiboles éventuelles ne seront pas nécessairement associées au minerai.

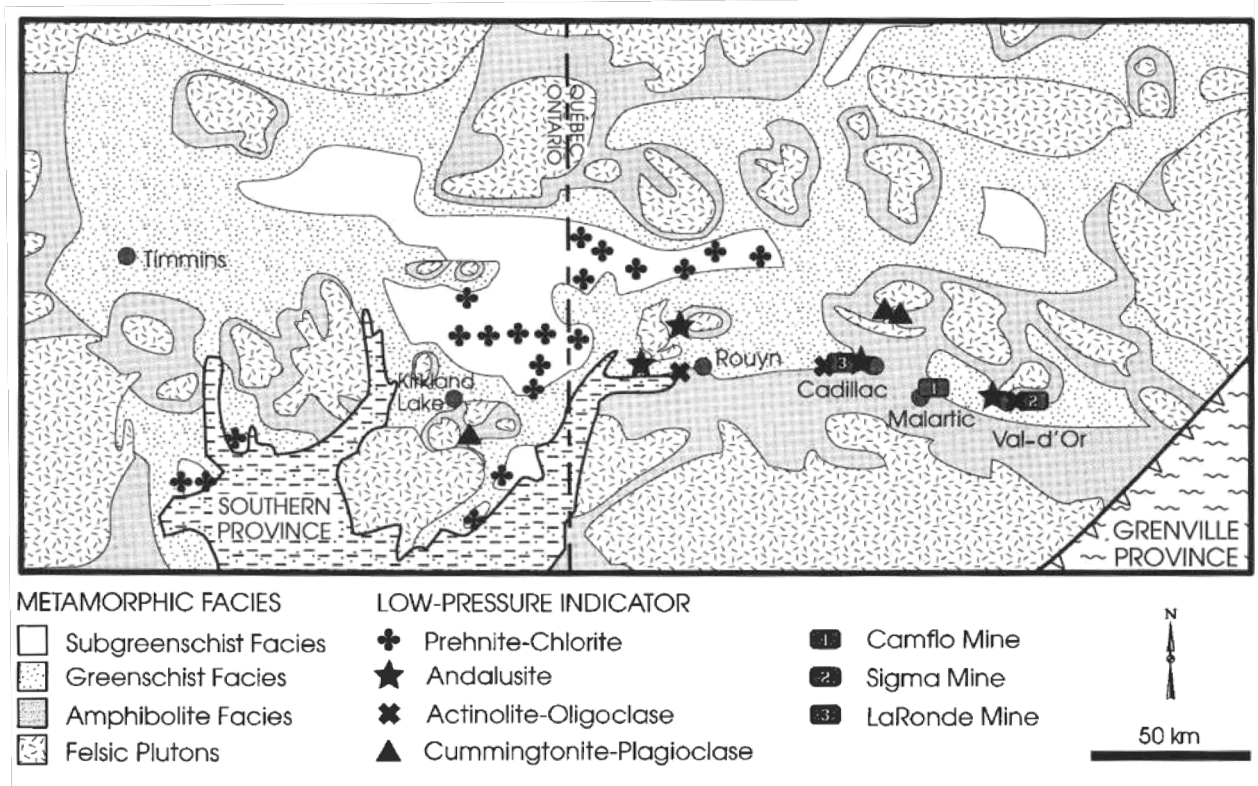


Figure 8. Carte des faciès métamorphiques de l'Abitibi (reproduit de Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 32, Powell *et al.*, « Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec », p. 801, © 1995, NRC Research Press ou ses concédants de licence).

Au nord de la sous-province de l'Abitibi se trouvent les sous-provinces de La Grande et d'Opinaca. Près de la limite entre celles-ci se trouvent le gisement Roberto et la mine Éléonore. Situées dans un contexte géologique similaire, les roches de cette région ont aussi été métamorphosées au faciès de schiste vert à amphibolite-inférieur avec une température maximale évaluée à 500°C (Bandyayera, D. *et al.*, 2010). Tout comme en Abitibi, la présence d'actinolite et de trémolite y est donc probable.

Mines d'or canadiennes

Les mines d'or dont des échantillons de roches ont été étudiés sont situées au nord de la Baie d'Hudson (figure 9). Ces mines sont localisées dans l'autre type de formations de fer, le type Algoma (Sherlock, Pehrsson, Logan, Hrabi et Davis, 2004). Au contraire du type lac Supérieur, formé sur les marges continentales, ce type de formations de fer s'est constitué dans les fonds océaniques lors d'événements volcaniques à l'Archéen (> 2500 Ma). Ces formations sont donc associées avec des roches volcaniques mafiques, telles que des basaltes, et ont ensuite été déformées et métamorphisées au Protérozoïque lors de plusieurs événements tectoniques entre 1800 et 1900 Ma. L'or aurait précipité dans les formations de fer lors de la circulation de fluides hydrothermaux associés à la déformation. Puisque le métamorphisme était au faciès de schiste vert à amphibolite inférieure, donc de degré moyen, le contexte est propice au développement de PMA d'amphiboles de la série actinolite-trémolite dans les basaltes et de la série grunérite-cummingtonite dans les formations de fer. Puisque ce contexte géologique est plus similaire à la mine d'or Homestake, nous avons inclus ces mines dans notre investigation.

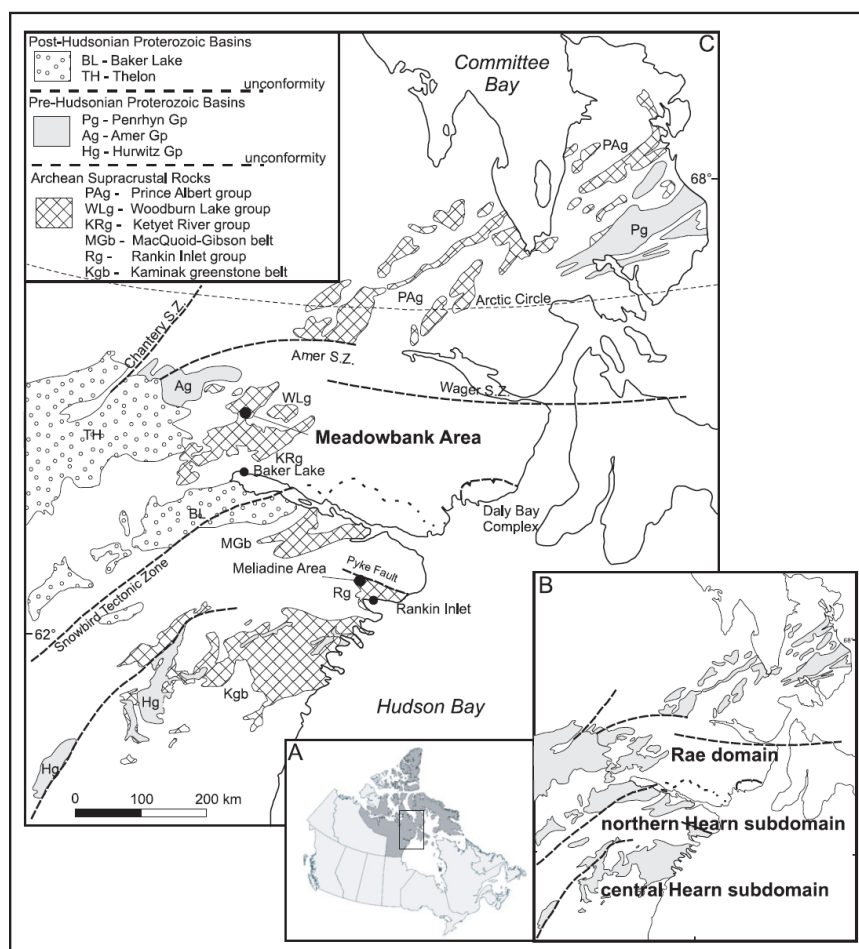


Figure 9. Localisation et carte géologique simplifiée des mines d'or canadiennes (reproduit de Sherlock *et al.*, *Exploration and Mining Geology*, Vol.13, p. 68, © 2004 avec permission de l'Institut canadien des mines, de la métallurgie et du pétrole).

Mines de fer québécoises

Les mines de fer québécoises proviennent aussi de formations de fer ou situées dans des massifs plutoniques de type AMCG²⁰. Deux des trois mines de fer québécoises actives en octobre 2015 proviennent de formations de fer. Comme celles du Minnesota, les formations de fer québécoises se sont formées sur la marge continentale du craton supérieur vers 1880 Ma (figure 4). Par contre, elles ont été intensément déformées et métamorphosées lors de l'Orogénie Grenvillienne, une collision continentale s'étant déroulée entre 1200 et 980 Ma et ayant formé la Province de Grenville, une chaîne de montagnes d'une envergure similaire à l'Himalaya actuelle dont on trouve les vestiges dans les collines des Laurentides. Le degré de métamorphisme étant élevé, il est possible que les PMA d'amphiboles aient été transformées en grenat-almandin, en pyroxènes et en olivine-fayalite (figure 1). S'il y en avait, les PMA d'amphiboles seraient cependant associées au minerai.

La troisième mine de fer est située dans le complexe de Havre-Saint-Pierre sur la Côte-Nord. Ce massif plutonique est de type AMCG (Jébrak et Marcoux, 2008), qui sont des intrusions communes dans la Province du Grenville. Celui de Havre-Saint-Pierre est riche en oxyde de titane et de fer (Jébrak et Marcoux, 2008). Le fer étant contenu dans l'ilménite, il n'y a pas de PMA d'amphiboles présagées dans ce contexte géologique.

4.3.1.4 Contextes géologiques des mines actives du Québec et du Canada

Le tableau 8 présente les résultats de la revue bibliographique. Pour chaque mine, on y trouve la présence d'amphiboles et leur type, lorsque rapporté (cummingtonite, grunérite, trémolite, actinolite, anthophyllite), ainsi qu'une brève description géologique des minéraux de ces mines.

Parmi les mines actives au Québec en 2015, notre revue bibliographique révèle la présence de PMA d'amphiboles dans six mines d'or sur neuf et dans deux mines de fer sur trois. Des amphiboles non PMA de type non spécifiées sont également mentionnées dans une autre mine d'or et une autre mine de fer. Pour ce qui est des dix mines d'or fermées, la présence de PMA d'amphiboles est révélée dans trois mines et celle d'amphiboles de type non spécifié, dans une mine.

Pour les mines d'or québécoises, comme attendu d'après le contexte géologique des mines de l'Abitibi-Témiscamingue (section 1.2.2), les PMA d'amphiboles identifiées sont issues de la solution solide trémolite-actinolite (tableau 8). Pour les mines d'or canadiennes, comme attendu d'après le contexte géologique des mines d'or dans des formations de fer (section 1.2.2), les PMA d'amphiboles identifiées sont issues de la solution solide grunérite-cummingtonite, alors que de l'actinolite est rapportée dans les basaltes environnants. Quant aux mines de fer, bien que le degré métamorphique élevé des mines Fire Lake et Mont-Wright ne laissait pas nécessairement présager leur présence, de la grunérite, de la cummingtonite et, en plus faible quantité, de l'actinolite et de la trémolite ont été décrites autour de ces mines. Il est cependant important de noter que la grunérite et la cummingtonite se trouvent dans le faciès silicaté des formations de fer du mont Wright et que ce faciès n'est pas exploité actuellement.

²⁰ AMCG, anorthosite-mangérite-charnockite-granite

**Tableau 8. Présence de particules minérales allongées dans les mines d'or et de fer :
Résultats de la revue bibliographique**

Mine (région)	PMA identifiée	Aucune mention de PMA	Commentaire	Référence
MINES D'OR ACTIVES (Québec)				
Beaufor (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée	(Tremblay, 2001) (Chabot, 1998)
Canadian Malartic (A-T)	Tr Act		Actinolite retrouvée sous forme de filon et recoupant la diorite à pyrite et le porphyre albitisé. De plus, on la trouve en agrégat radial sur les plans de diaclase. Aussi retrouvée comme amphiboles, en plus faible quantité : actinolite et trémolite dans la péridotite.	(Sanfaçon, Grant et Trudel, 1987) (Trudel et Sauvé, 1992) (Dresser et Denis, 1951) (Eakins, 1962)
Casa Berardi (B-J)	Gru Act		Présence de moins de 5 % de grunérite et rare présence d'actinolite dans la matrice du <i>Golden Pond sequence</i>	(La Flèche et Camiré, 1996) (Pilote <i>et al.</i> , 1990) (Bergeron et Dompierre, 1993)
Éléonore (B-J)	Act		Une partie de la minéralisation associée à des veines métasomatiques à cordiérite, avec tourmaline, biotite, grenat et ± sulfures. Contiennent des proportions variables de quartz, de microcline, de tourmaline, d'actinolite, de diopside, de feldspaths aussuritisés, de clinozoïsite et d'arsénopyrite.	(Bandyayera, D., Fliszár, A., 2007; Bandyayera, D., Lacoste, P., 2009) (Ravenelle, 2013)
Goldex (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Jébrak, 2008) (Rafini, 2014)
Bachelor (B-J)	Act		Présence d'actinolite dans les basaltes de la région de Desmaraisville	(Lauzière, 1989)
Lapa (A-T)	Act		Des cibles d'exploitation sont entourées d'actinolite. L'actinolite est associée aux roches mafiques et ultramafiques.	(Simard, Gaboury, Daigneault et Mercier-Langevin, 2013) (Beaudoin, 1989) (Dresser, 1951)

Mine (région)	PMA identifiée	Aucune mention de PMA	Commentaire	Référence
LaRonde (A-T)	Act		Actinolite dans les basaltes métamorphisés au faciès schiste vert.	(Chown, Daigneault, Mueller et Mortensen, 1992) (Dubé, Mercier-Langevin, Hannington, Davis et Lafrance, 2004) (Jébrak, 2008) (Franklin, Gibson, Jonasson et Galley, 2005; Franklin, Sangster et Lydon, 1981) (Hannington, Ronde et Petersen, 2005) (Mercier-Langevin, 2005) (Daigneault, Mueller et Chown, 2002)
Westwood (A-T)		Amp	Présence d'amphiboles (variété non spécifiée) à proximité de Mooshla dans la roche encaissante.	(Wright-Holfeld, Mercier-Langevin et Dubé, 2010) (Yergeau, Sanschagrin, Maynard, St-Arnaud et Greer, 2014)
MINES D'OR ACTIVES (Canada)				
Meadowbank (Nunavut)	Cum Gru Ath		Gisement d'or traversé par un BIF (Auriferous Iron Formation) dans lequel grunérite et cummingtonite sont trouvées. La grunérite est un des principaux minéraux trouvés autour des dépôts d'or. De la grunérite a été également trouvée dans une zone exploitée dans la Third Portage. Présence de schiste à talc et d'anthophyllite dans lithographie de Meadowbank de la zone A.	(Sherlock, 2004) (Gourcerol, Thurston, Kontak, Côté-Mantha et Biczok, 2015)(Janvier <i>et al.</i> , 2015)
Meliadine (Nunavut)	Gru Act		Présence d'actinolite dans les roches mafiques, de grunérite dans toutes les formations de fer, quelquefois avec l'or. Carpenter 2004 et Lalwley 2015 présentent plusieurs photos MEB de très fines aiguilles de grunérite dans les formations de fer aurifères.	(Carpenter et Duke, 2004) (Lawley <i>et al.</i> , 2015)

Mine (région)	PMA identifiée	Aucune mention de PMA	Commentaire	Référence
MINES D'OR FERMÉES (Québec)				
Lac Herbin (A-T)		Amp	Amphiboles présentes dans le faciès non déformé de l'intrusion de Bourlamaque à hauteur de 5 % environ (déstabilisation en chlorite dans les zones de cisaillement) et visibles dans certains dykes mafiques porphytiques. Elles montrent généralement de la chloritisation et une fracturation faible à modérée qui peut les démembrer. Certaines amphiboles conservent toutefois un cœur qui semble relativement frais	(Sauvé, Perrault et Trudel, 1986) (Bazinet, Chouteau et Legault, 1984) (Imreh et Trudel, 1990) (Lemarchand, 2012)
Monique (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Girard, 1985) (Beaumier, 1989)
Mouska (A-T)	Act		Présence d'actinolite dans les couches principales associées au gisement (basalte, andésine, microdiorite). L'andésine serait très fracturée et l'actinolite se trouverait à l'intérieur des fractures.	(Belkabir et Hubert, 1995; Belkabir, Hubert et Hoy, 2004)
Matagami (B-J)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Jébrak, 2008) (Franklin, 2005) (Hammouche, Boszczuk et Roy, 2010) (Hannington <i>et al.</i> , 2005) (Debreil, 2014)
Lamaque (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Sauvé, 1993)
Camflo (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Sauvé et Makila, 1987)
Manitou (A-T)	Act		Faciès supérieur des schistes verts au faciès des amphibolites (présence de chlorite, d'actinote et d'épidote)	(Lavoie, S., 2003)
Sullivan (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Sauvé, Imreh et Trudel, 1993)
Opémiska (B-J)	Tr Act Amp		Gangue de composition principalement gabbroïque contenant de l'actinolite aciculaire légèrement trémolitique	(Lavoie, J. S., 1972) (Bélanger, 1979)
Lac Dufault (A-T)		X	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée.	(Dugas et Hogg, 1962)(Eckstrand <i>et al.</i> , 1995) (L'Heureux, 1992)

Mine (région)	PMA identifiée	Aucune mention de PMA	Commentaire	Référence
MINES DE FER ACTIVES (Québec)				
Fire Lake (C-N)	Cum Act		Petite quantité de cummingtonite dans le quartzite qui rencontre la formation de fer près des lacs Dunn, Fire et Midway, et en quantité moindre près des rivières Carheil et Moisie. Dans la formation de fer du lac Wabush, au faciès des oxydes, présence en petite quantité de cummingtonite et d'actinote. Dans la formation de fer à silicates-carbonates, il y a présence de 5 % de cummingtonite.	(Clarke, 1967)
Lac Tio (C-N)		Amp	Aucune mention de ces minéraux dans la documentation examinée. Toutefois, dans l'image d'une lame mince du document du dossier du Lac Tio, nous pouvons y observer une amphibole prismatique.	(Retty, 1944) (Sharma et Franconi, 1975) (Bolle, Charlier, Bascou, Diot et McEnroe, 2014)
Mont-Wright (C-N)	Cum Gru Tr Act		Présence de 10 - 30 % de cummingtonite ou d'actinolite dans les formations de silicates de fer entre les lacs Sudbury et Daigle, situés au NE de la mine. Plus au sud, la formation de silicate de fer ne contient plus de cummingtonite qui a été remplacée par des pyroxènes, mais renferme en moyenne 10 % de grunérite. Très peu de ces formations de silicates de fer sont présentes dans la zone exploitée aujourd'hui. Cette zone contient plutôt une formation d'oxyde de fer qui contient localement 5 -10 % d'actinolite et de cummingtonite dans les zones les plus riches en magnétite.	(Clarke, 1977)

Act, actinolite; Amp, amphibole non PMA non précisée; Ath, anthophyllite; Cum, cummingtonite; Gru, grunérite; Tr, trémolite

Régions : A-T, Abitibi-Témiscamingue; B-J, Baie-James; C-N, Côte-Nord

4.3.2 Caractérisation minéralogique

Parmi les mines pour lesquelles la revue de la littérature a révélé la présence de PMA d'amphiboles, 49 lames minces ont pu être investiguées par microscopie optique, et de ce nombre, 10 ont été sélectionnées pour des analyses par MEB. Les résultats de la caractérisation minéralogique effectuée par microscopies optique et électronique sont présentés sous forme de tableaux synthèses et de figures, puis illustrés par quelques photographies. Les résultats d'analyse minéralogique de chaque lame se trouvent en annexe (annexes D.I à D.III).

Sur les 36 lames minces provenant de 11 mines d'or québécoises, 18 d'entre elles associées à huit mines contiennent de 10 à 70 % d'amphiboles (tableau 9 et figure 10). Les types d'amphiboles trouvés sont l'actinolite (14/18) et la hornblende (4/18). Parmi ces 18 lames,

l'actinolite et la hornblende ont une morphologie en aiguille dans 16 d'entre elles, provenant de 7 mines. Les figures 11 et 12 présentent des photos macroscopiques, microscopiques et d'autres produites par MEB d'échantillons contenant de l'actinolite, respectivement sous formes prismatiques et d'aiguilles. La figure 12 montre notamment que les aiguilles d'actinolite dans l'échantillon de la mine L se trouvent près de grains d'or visibles. C'est d'ailleurs la seule mine d'or examinée pour laquelle il est possible de conclure que les aiguilles d'amphiboles se trouvent dans le minerai exploité.

Tableau 9. Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines d'or québécoises

Mine (nombre de lames)	Nombre de lames avec amphiboles	% amphibole	% aiguille	Type amphibole	Diamètre moyen (µm)
B (2)	2	20	20	Hbl	15
C (2)	0	0	0	na	na
D (2)	1	20	20	Hbl	3
E (2)	0	0	0	na	na
F (1)	1	10	10	Hbl	na
H (1)	0	0	0	na	na
I (3)	1	30	30	Act	3
K (9)	8	5-50	5-45	Act	30-518
L (3)	2	20-60	20-60	Act	175-206
M (2)	1	70	70	Act/Hbl	23
X (9)	2	15-20	0	Act	220-388

na : non applicable; Act : actinolite; Hbl : hornblende

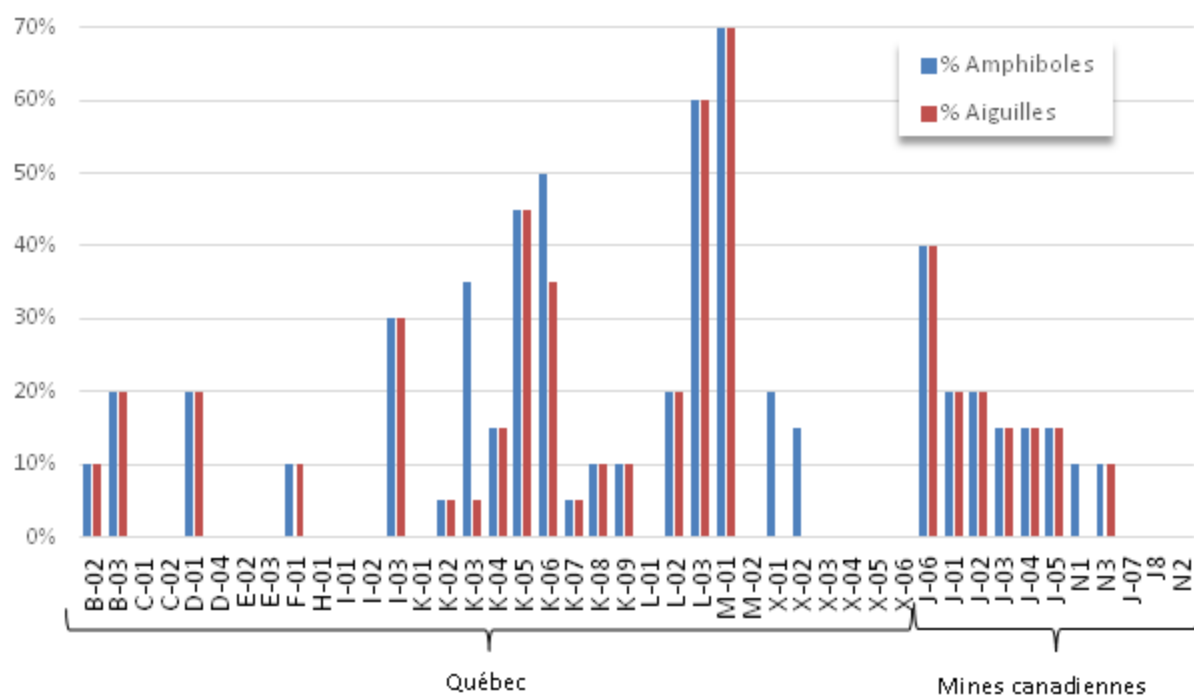


Figure 10. Compilation de la caractérisation minéralogique des mines d'or.

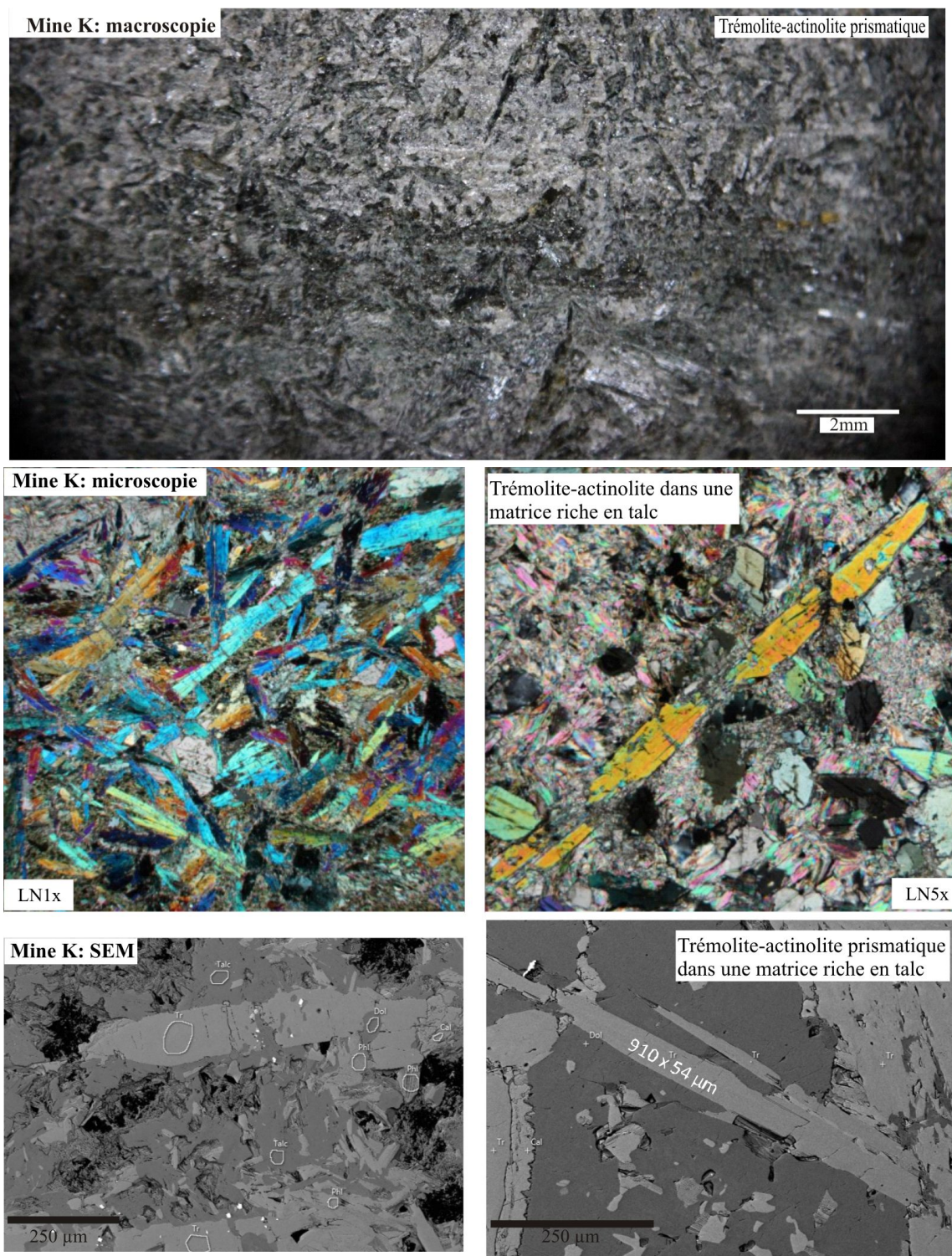


Figure 11. Photographies d'actinolite prismatique de la mine d'or québécoise K.

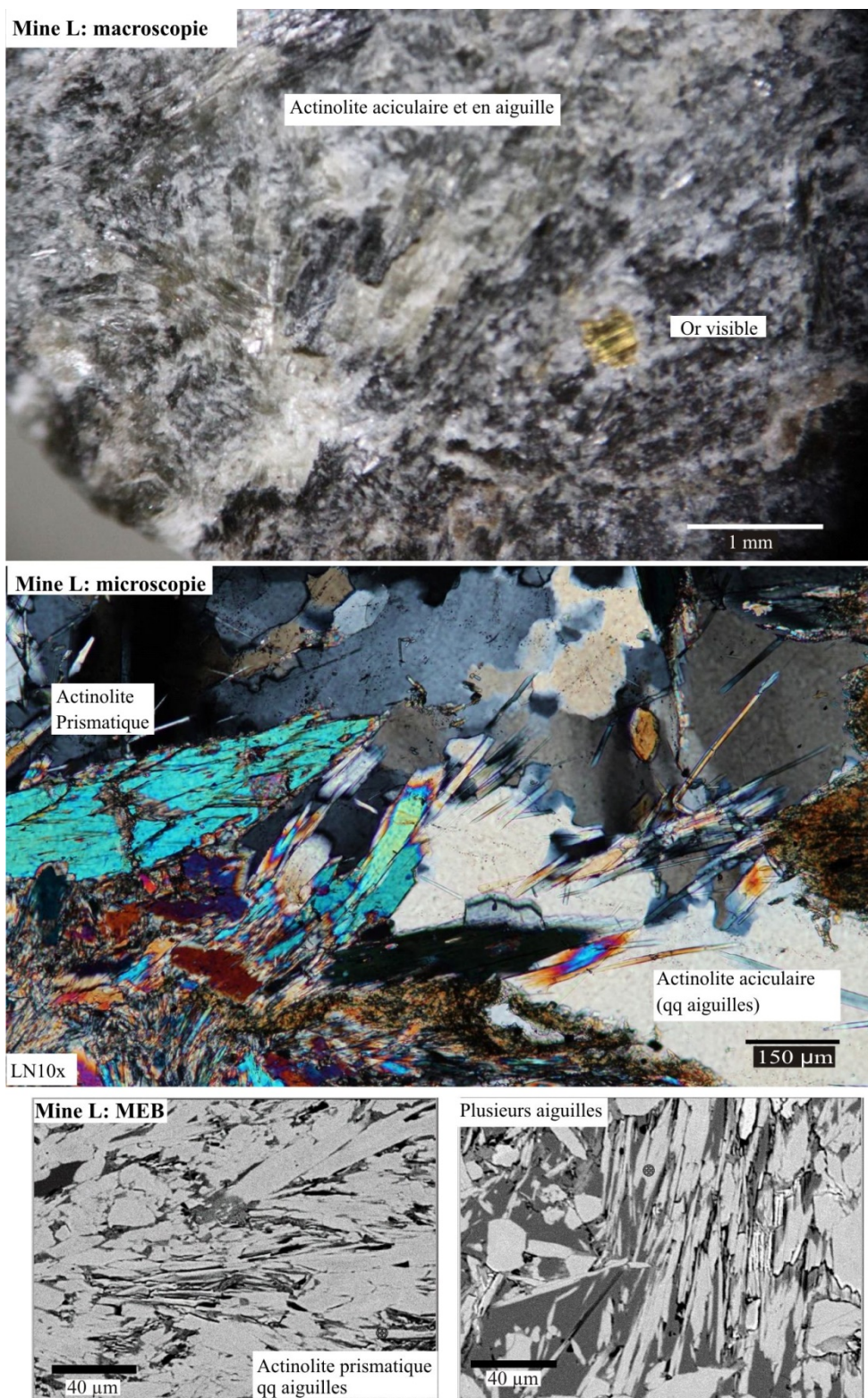


Figure 12. Photographies d'actinolite aciculaire et en aiguille de la mine d'or québécoise L.

Parmi les échantillons provenant des deux mines d'or canadiennes, sept lames examinées sur un total de 11 contiennent des amphiboles (tableau 10 et figure 10), incluant 7 lames avec de la grunérite, de l'anthophyllite, de la trémolite ou de l'actinolite dont six dans lesquelles ces PMA d'amphiboles présentent une morphologie fibreuse ou en forme d'aiguille (figure 13).

Tableau 10. Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines d'or canadiennes

Mine (nombre de lames)	Nombre de lame avec amphibole	% amphibole	% aiguille	Type amphibole	Diamètre moyen (µm)
J (8)	6	15-40	15-40	Gru Ath/Tr	1
N (3)	1	10	0	Act/Hbl	na

Act, actinolite; Ath, anthophyllite; Gru, grunérite; Hbl, hornblende; na, non applicable; PMA, particules minérales allongées; Tr, trémolite

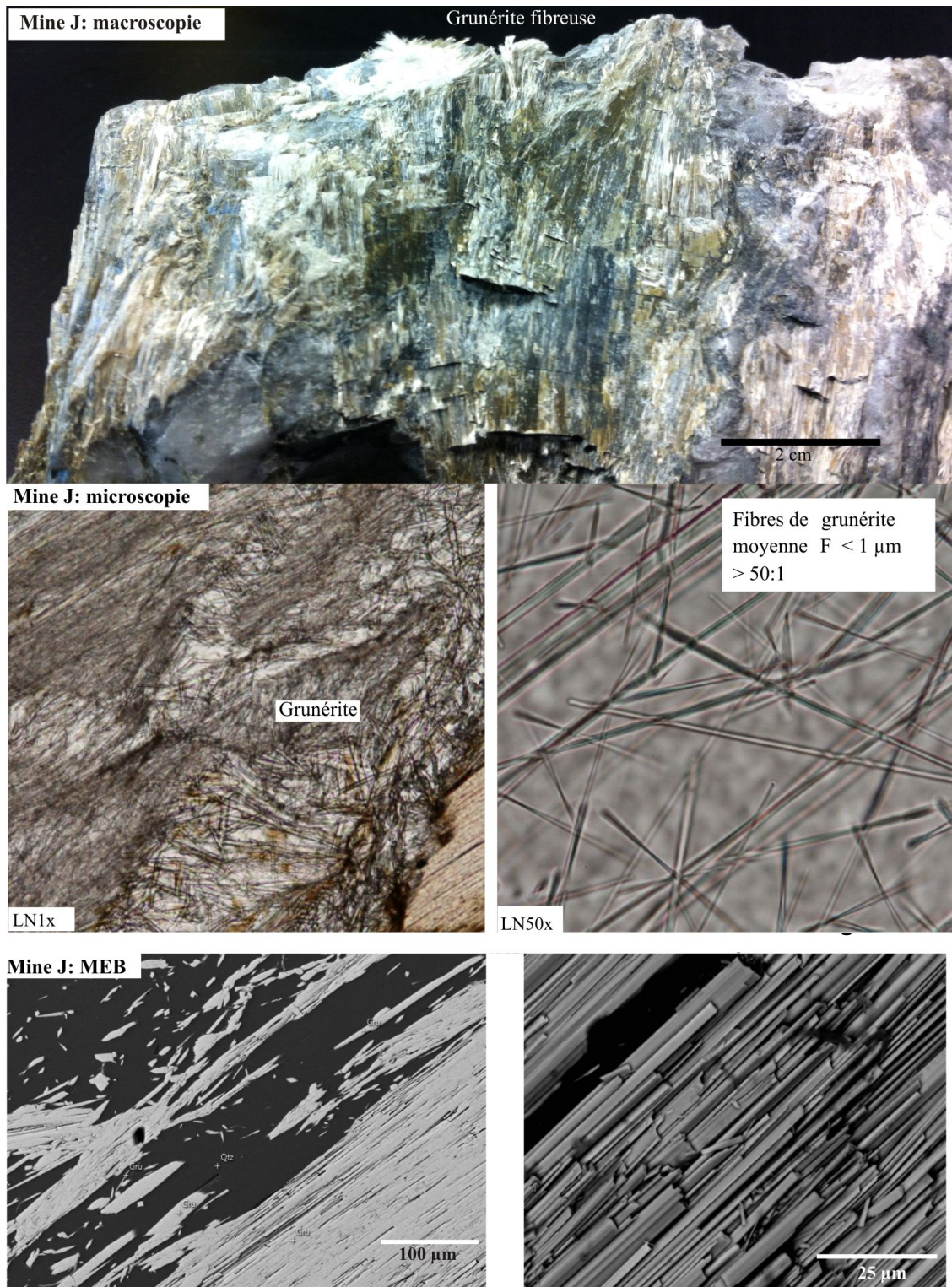


Figure 13. Photographies de grunérite de la mine canadienne J.

Parmi les échantillons provenant des deux mines de fer québécoises, deux lames examinées sur un total de cinq contiennent de l'actinolite (tableau 11) sous forme de prismes trapus (figure 14).

Tableau 11. Résumé de l'analyse minéralogique détaillée des échantillons provenant des mines de fer québécoises

Mine (nombre de lames)	Nombre de lame avec amphibole	% amphibole	% aiguille	Type amphibole	Diamètre moyen (µm)
A (3)	2	15-60	0	Act	na
G (2)	0	0	0	na	na

Act, actinolite; na, non applicable; PMA, particules minérales allongées

Résumé de la section

En résumé, le contexte géologique des mines d'or québécoises est complètement différent de celui de la mine d'or Homestake au Dakota. Cette dernière est située dans des formations de fer ayant été métamorphosées à des degrés moyens favorables à la formation des mêmes PMA d'amphiboles que pour les mines de fer du Minnesota (figure 5), c'est-à-dire une forte proportion de grunérite; cependant, la grunérite de la mine Homestake n'est pas nécessairement associée au minerai d'or. Par contraste, les mines d'or québécoises sont situées dans une ceinture de roches vertes archéennes (figure 7). Le métamorphisme régional au faciès de schiste vert rend la présence de PMA d'amphiboles de la solution solide trémolite-actinolite très probable dans les roches mafiques comme les basaltes (figure 8). En plus du type de PMA d'amphiboles, la différence majeure entre ces contextes est l'association spatiale systématique entre les PMA d'amphiboles et le minerai exploité dans les mines d'or associées à des formations de fer, alors que ce lien est possible, mais pas systématique pour les mines d'or québécoises. La revue de littérature de sites miniers a confirmé les hypothèses déduites par leurs contextes géologiques : des PMA d'amphiboles ont été rapportées dans sept des neuf mines d'or actives et dans quatre des dix mines d'or fermées (tableau 8).

Quant au contexte géologique des mines de fer québécoises, il est légèrement différent de celui des mines de fer américaines pour lesquelles des problèmes de santé reliés aux PMA d'amphiboles ont été documentés. En effet, même si les formations de fer des mines du Minnesota et du Québec se sont formées à la même période et sur la même marge continentale (figure 4), les premières ont été métamorphosées par l'intrusion d'un pluton, alors que les secondes ont été métamorphosées et déformées lors d'une collision continentale majeure. La formation de PMA d'amphiboles, telles que la grunérite et la cummingtonite, est donc plus probable au Minnesota puisque le degré de métamorphisme y est moins élevé (figure 1); de plus, les PMA d'amphiboles y sont plus associées au minerai de fer. La revue de littérature n'était pas tout à fait concordante avec ce qui était attendu à partir du contexte géologique des mines de fer québécoises, puisque l'environnement immédiat (mais hors zone exploitée) contient des PMA d'amphiboles (tableau 8).

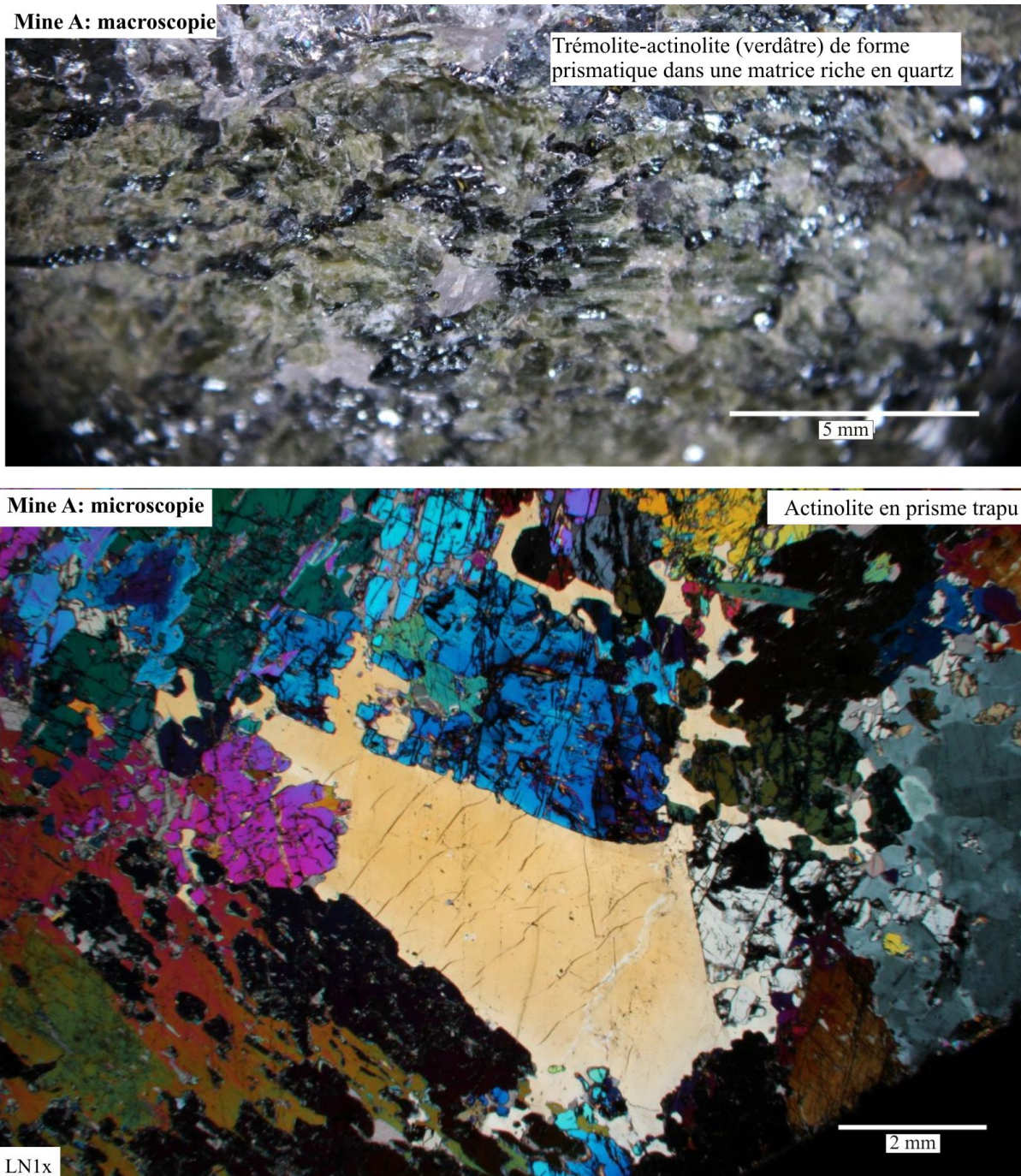


Figure 14. Photographies d'actinolite prismatique de la mine de fer québécoise A.

L'étude minéralogique de onze mines d'or et de deux mines de fer québécoises a révélé la présence de PMA d'amphiboles dans huit de ces mines. Une morphologie en aiguille a aussi été documentée dans sept de ces mines. Contrairement aux mines canadiennes et à celles de Homestake et Minnesota, où la grunérite est la principale PMA d'amphiboles, l'actinolite est la plus présente dans les sites miniers québécois, mais la hornblende est aussi présente.

4.4 Toxicologie des PMA

La revue des données toxicologiques visait spécifiquement à recenser les informations publiées pour les PMA non amiantiformes en lien avec les espèces chimiques présentes dans les mines d'or et de fer, soit l'actinolite, la trémolite, la ferroactinolite et la grunérite-cummingtonite (amosite). Dans ces mines, les PMA sont principalement présentes sous la forme de fragments de clivage.

Aucune étude *in vitro* et seulement 3 études *in vivo* ont été recensées pour la période visée par la revue de la littérature (entre 1990 et juin 2016). Les articles scientifiques publiés depuis 1990 ont également été considérés afin de discuter de l'influence de différents paramètres (chimiques et dimensionnels) sur la toxicité de ces particules. En effet, en absence de connaissances sur les mécanismes des PMA d'amphiboles non amiantiformes ou des PMA non amphiboles contenues dans les mines d'or et de fer, certains mécanismes mieux documentés pour d'autres PMA, amphiboles amiantiformes, peuvent être extrapolés en raison de similitudes dans leur nature chimique ou leur dimension. Ces données sont présentées dans un premier temps.

4.4.1 Toxicité des particules minérales allongées

La séquence d'événements de même que les mécanismes d'action responsables de la toxicité et de la cancérigénicité des fibres d'amiante ne sont pas encore complètement élucidés. Les données actuellement disponibles dans la littérature mettent en évidence que ces fibres interfèrent avec l'appareil mitotique, stimulent la prolifération cellulaire, induisent des lésions génétiques et épigénétiques de même que de la toxicité cellulaire, de la fibrose, du stress oxydant et de l'inflammation pulmonaire (Ballan *et al.*, 2014). Les mécanismes associés à la toxicité des particules d'amiante incluent des paramètres de nature dimensionnelle (longueur, diamètre, rapport longueur/diamètre et surface de contact avec le matériel biologique) et de nature chimique (composition chimique et réactivité de surface) (Aust, Cook et Dodson, 2011).

4.4.1.1 Caractéristiques dimensionnelles

Plusieurs études toxicologiques réalisées chez l'animal ou *in vitro* ont montré que les caractéristiques dimensionnelles des fibres jouent un rôle important sur le plan de leur toxicité. Les effets sont plus importants lorsque la longueur des fibres augmente et que leur diamètre diminue (AFSSET, 2009; NIOSH, 2011). Il est difficile de conclure définitivement sur la cancérigénicité des fibres courtes, notamment parce qu'il est complexe d'obtenir des échantillons représentatifs ne contenant que ce type de fibres, et un effet cancérigène ne peut être complètement écarté, quoique leur toxicité semble moindre comparativement à celle des fibres longues (AFSSET, 2009). Les connaissances disponibles confirment, par contre, le potentiel cancérigène des fibres longues. Ces fibres sont moins bien phagocytées que les fibres plus courtes, ce qui entraîne un phénomène appelé « phagocytose frustrée » qui mène à la génération d'espèces réactives de l'oxygène (*reactive oxygen species* ou ROS) et à la libération d'enzymes digestives pouvant entraîner la lyse des membranes (NIOSH, 2011). Selon Lippmann, le cancer pulmonaire serait plus étroitement associé aux fibres longues et fines (longueur > 10 µm, diamètre < 0,15 µm) alors que le mésothéliome serait associé aux fibres d'une longueur de > 5 µm et d'un diamètre de < 0,1 µm (Lippmann, 2014).

Quatre revues portant sur la toxicité de fragments de clivage ont été recensées, de même qu'une nouvelle analyse de données déjà publiées. Trois revues concluent que les fragments de clivage ne sont pas cancérigènes ni aussi actifs que les fibres amiantiformes (Addison et

McConnell, 2008; Ilgren, 2004; Mossman, 2008). En se basant sur les mêmes études que ces trois derniers auteurs, la quatrième revue conclut que les fibres amiantiformes constituent un risque supérieur, mais sans exclure une toxicité des fragments de clivage (Williams, Dell, Adams, Rose et Van Orden, 2013). Ces derniers auteurs justifient leur conclusion par le fait que les caractéristiques dimensionnelles des particules utilisées dans les différentes études considérées étaient insuffisamment décrites. Une analyse de données recueillies à l'occasion de plusieurs études (50 échantillons divers de PMA) a permis d'établir certaines caractéristiques des PMA associées au développement du mésothéliome à la suite d'instillation pleurale chez le rat (Cook, P. M. *et al.*, 2016). Ces données ne sont pas compatibles avec l'hypothèse d'une élimination rapide des PMA courtes qui atteignent la plèvre; les auteurs concluent cependant que malgré l'abondance de PMA de faible rapport L/D dans les tissus pleuraux, ces particules pourraient avoir une toxicité réduite en raison de leur tendance à s'agréger (Cook, P. M. *et al.*, 2016). D'après une étude récente, les simulations de modèles dosimétriques ont montré qu'en raison de la géométrie allongée des PMA, la quantité de particules inhalées au niveau des voies respiratoires hautes et le dépôt pulmonaire sont plus élevés que pour des particules sphériques de un micromètre de diamètre de même masse (Asgharian, Owen, Kuempel et Jarabek, 2018)

Puisque les fragments de clivage peuvent présenter des caractéristiques morphologiques parfois très semblables à celles des structures amiantiformes, tout en étant de même nature chimique, la communauté scientifique s'interroge toujours sur leur toxicité (Aust *et al.*, 2011; Case, B. W., 1991).

4.4.1.2 Réactivité de surface, composition chimique et biopersistance

La réactivité de surface joue également un rôle dans la toxicité des fibres. La présence de métaux, en particulier le fer, peut agir comme catalyseur et mener à la génération de ROS, lesquelles peuvent être responsables de lésions à l'ADN (Aust *et al.*, 2011). Le fer peut être présent à la surface des fibres ou encore, ce qui est plus probable, il peut être mobilisé à partir de la fibre, puisque ce métal est partie intégrante de la structure chimique de plusieurs PMA, dont l'amosite, l'actinolite et la trémolite. Pour une concentration massique équivalente, les effets attribuables au stress oxydant sont plus importants pour les fibres longues comparativement aux fibres courtes (Aust *et al.*, 2011). Les propriétés de surface des fibres leur confèrent également la capacité d'adsorber des macromolécules biologiques (protéines, ADN, phospholipides) ou des molécules chimiques (HAP, fer et autres métaux) ce qui a pour résultat de modifier l'interaction fibre/cellule et ainsi engendrer une augmentation ou une diminution de la toxicité selon la nature de l'agent adsorbé (AFSSET, 2009).

La composition et la structure chimique des fibres affecteront leur vitesse de dissolution dans les liquides et les tissus biologiques. Comme mentionné plus haut, la phagocytose frustrée des fibres longues entraîne la libération d'enzymes digestives associées à la lyse des membranes (NIOSH, 2011). Ces facteurs influencent la biopersistance des fibres dans le tissu pulmonaire et leur toxicité (AFSSET, 2009). Puisque les fragments de clivage sont en général plus courts et plus larges que les fibres amiantiformes, ils sont habituellement moins persistants que les fibres d'amiante, notamment parce qu'ils sont phagocytés plus facilement (NIOSH, 2011). La communauté scientifique s'interroge cependant toujours sur l'influence relative des paramètres chimiques et dimensionnels sur les effets pulmonaires associés aux PMA (Aust *et al.*, 2011; NIOSH, 2011).

4.4.1.3 Génotoxicité directe et indirecte

Les fibres minérales peuvent induire une génotoxicité directe à la suite d'interactions fibres-cellules, en provoquant la production d'espèces réactives de l'oxygène pouvant elles-mêmes induire l'oxydation des bases nucléiques d'ADN ou des bris de brins d'ADN, phénomènes associés à des mutations génétiques (Nymark, Wikman, Hienonen-Kempas et Anttila, 2008). Une revue des connaissances sur les mécanismes de la pathogenèse des maladies associées à l'amianté (Huang, Jaurand, Kamp, Whysner et Hei, 2011) conclut que les fibres d'amianté exercent un effet mutagénique avéré tant *in vitro* qu'*in vivo* sur les plans génétique et chromosomique, particulièrement mis en évidence pour le mésothéliome; les réponses biologiques induites par les PMA d'amianté (production de ROS, atteintes de l'ADN et des chromosomes, activation de la protéine P53, apoptose, inflammation) montrent des spécificités cellulaires, les cellules pulmonaires et pleurales étant plus sensibles que les cellules bronchiques.

Les mécanismes associés à une génotoxicité indirecte ont été en partie abordés dans la section précédente. Parmi les plus souvent énumérés, il faut mentionner la phagocytose des fibres par des macrophages qui induit elle-même une inflammation persistante et l'activation des macrophages (associées à la génération d'espèces réactives de l'oxygène et de l'azote); l'activation de voies de signalisation intracellulaires, la stimulation de la prolifération et de la survie cellulaires, et l'induction d'altérations épigénétiques (IARC, 2012a).

4.4.1.4 Coexpositions

La présence d'autres substances que les PMA dans l'environnement de travail peut également contribuer à la toxicité pulmonaire. C'est le cas notamment de la silice cristalline, un contaminant omniprésent dans les mines et dont les valeurs limites d'exposition sont souvent dépassées (Björ, B. *et al.*, 2010; Churchyard *et al.*, 2004; Hedlund *et al.*, 2008; Hnizdo *et al.*, 1990; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1993; Hwang, 2013; Ostiguy *et al.*, 2012; Sheehy et McJilton, 1990; Steenland *et al.*, 2001; Tse *et al.*, 2007). La silice présente une surface très réactive, ce qui peut conduire à la génération de ROS venant s'ajouter au stress oxydant provoqué par les PMA. Elle peut aussi contribuer à la mort des macrophages, diminuant ainsi l'efficacité du processus de phagocytose. Le fer et d'autres métaux susceptibles de générer des espèces réactives de l'oxygène peuvent également augmenter la toxicité cellulaire (Aust *et al.*, 2011; NIOSH, 2011). Comme rapporté par Aust *et al.* (2011), une exposition simultanée au quartz et à certaines PMA (chrysotile ou amosite) augmente de façon importante la fibrose et favorise l'apparition de tumeurs chez l'animal.

Parmi les autres coexpositions trouvées dans les mines, les émissions de moteurs diesels et le radon ont été plus souvent mentionnés, bien qu'aucune publication ne traite particulièrement des effets toxicologiques de ces expositions concomitantes.

La phase particulière des émissions de moteurs diesels semble être responsable de la cancérigénicité démontrée chez l'animal. Ces particules issues de la combustion du diesel comportent un grand nombre de particules très fines et peu solubles; des études de surcharge pulmonaire ont fait état d'un important afflux de leucocytes, afflux associé à des effets inflammatoires, incluant la formation de ROS, favorisant l'apparition de maladies pulmonaires chroniques et de cancers (International Agency for Research on Cancer, 2014).

Le radon et ses produits de filiation émettent des particules alpha qui induisent des ROS s'attaquant directement à l'ADN génomique (Hubaux *et al.*, 2012); les mutations résultantes provoquent une séquence de réactions de réparation visant à éviter que les dommages ne perdurent dans le génome (Mullenders, Atkinson, Paretzke, Sabatier et Bouffler, 2009). Les rayonnements ionisants peuvent en plus induire des dommages épigénétiques tels qu'une instabilité génomique et l'interaction tissulaire entre les cellules atteintes et les cellules normales (International Agency for Research on Cancer, 2012b).

4.4.2 Études *in vivo* recensées

Trémolite

Au début des années 1990, Davis et collaborateurs ont comparé le risque de mésothéliome pour six groupes de rats ($n = 36$) ayant reçu chacun 10 mg de trémolite (dose unique) par injection intrapéritonéale (Davis, Addison, McIntosh, Miller et Niven, 1991). Six échantillons de trémolite présentant des caractéristiques différentes au regard du nombre de particules par milligramme de poussières, de la longueur des fibres et de la présence de fragments de clivage, ont ainsi été comparés. Les animaux ont été laissés en vie jusqu'à ce qu'ils présentent des signes de débilité ou de formation de tumeurs. Les rats ont ensuite été sacrifiés, autopsiés et les tissus prélevés pour un examen histologique. Les rats exposés aux trois échantillons contenant une forte proportion de fibres longues ont presque tous développé un mésothéliome (plus de 32 cas par groupe). Un quatrième échantillon était constitué principalement de fragments de clivage bien que quelques fibres très longues étaient présentes. Dans ce groupe, 24 des 36 rats ont développé un mésothéliome. Les deux derniers échantillons étaient majoritairement constitués de fragments de clivage, sans la présence de fibres longues. Dans ces groupes, deux et quatre cas de mésothéliome ont été observés. Les auteurs concluent que toutes les formes minérales de trémolite présentent un potentiel cancérogène, ce potentiel étant plus élevé pour les fibres longues (Davis *et al.*, 1991).

Trémolite et ferroactinolite

Quelques études ont montré le potentiel cancérogène de la ferroactinolite. À la suite de 12 instillations intratrachéales hebdomadaires, des rats ont été sacrifiés à des intervalles variant de 1 à 24 mois après la dernière instillation (Coffin, Palekar et Cook, 1983; Cook, Philip M., Palekar et Coffin, 1982). Les animaux exposés aux échantillons de ferroactinolite présentaient plus de tumeurs pulmonaires que ceux exposés à l'amosite. Les auteurs ont attribué ce résultat à la division des fibres de ferroactinolite en de nombreuses fibres minces (quatre fois plus de fibres deux ans après la dernière exposition que le nombre de fibres initialement instillé) (Cook, Philip M. *et al.*, 1982).

Plus récemment, Cyphert et collaborateurs ont déterminé l'effet inflammatoire, la toxicité pulmonaire et le développement de fibrose chez différents groupes de rats exposés par instillation intratrachéale à quatre types de roches contenant des PMA (dose unique de 0,5 ou 1,5 mg/rat) : amphiboles de Libby, chrysotile, trémolite et fragments de clivage de ferroactinolite (Cyphert *et al.*, 2012). Les sacrifices ont eu lieu un jour et trois mois après l'instillation. Des lavages broncho-alvéolaires ont été effectués pour le dosage de différents marqueurs d'inflammation et de toxicité et un examen histopathologique des tissus pulmonaires a également été réalisé. Les particules ont été caractérisées au regard de leur longueur, de leur diamètre, du rapport longueur/diamètre, du nombre total de PMA/mg d'échantillon, de leur aire de surface totale et de leur composition chimique. Les résultats de cette étude montrent que la

longueur des fibres et le rapport longueur/diamètre semblent étroitement associés au développement de la fibrose, dans l'ordre suivant : chrysotile > amphiboles de Libby > fragments de clivage de ferroactinolite > trémolite. Les auteurs attribuent la plus importante fibrose notée chez les animaux exposés au chrysotile à la présence d'un plus grand pourcentage de fibres longues et fines dans l'échantillon de chrysotile que dans ceux des amphiboles, malgré que le nombre de particules totales/mg d'éluat ait été quatre fois moindre dans l'échantillon de chrysotile que dans celui d'amphiboles de Libby. Les résultats de l'étude montrent que la relation entre l'importance de l'inflammation et le développement de la fibrose est complexe; alors que tous les échantillons de fibres ont provoqué une forte réponse inflammatoire aiguë, après trois mois la majorité des marqueurs étaient revenus au niveau de base, à l'exception d'un léger excès (néanmoins statistiquement significatif) pour les amphiboles de Libby (aux deux doses administrées) et aux fortes doses de chrysotile et de trémolite. Ces données valident l'hypothèse selon laquelle les fibres longues et fines seraient responsables des effets fibrogènes (Cyphert *et al.*, 2012).

En utilisant la même méthodologie et les mêmes PMA que celles décrites dans l'article de Cyphert et collaborateurs (2012), Kodavanti et collaborateurs ont étudié les effets précoces et tardifs d'une exposition à ces particules sur le métabolisme et l'inflammation (Kodavanti *et al.*, 2014). Les différents biomarqueurs ont été mesurés dans le sérum pendant 18 mois. Cet article rapporte également les résultats d'une exposition de 13 semaines par inhalation aux amphiboles de Libby (concentrations de 1,0, 3,3 et 10 mg/m³) et à l'amosite (3,3 mg/m³). Les rats exposés par instillation à la trémolite et à la ferroactinolite présentaient globalement des modifications moins importantes en matière de concentration de l'ensemble des biomarqueurs sériques (inflammation, détérioration du métabolisme, dysfonctionnement immunitaire et cancer) comparativement aux rats exposés au chrysotile et aux amphiboles de Libby. Les seuls résultats significatifs rapportés dans l'étude par inhalation concernaient une augmentation de la concentration sérique de l'alpha-2 macroglobuline (biomarqueur d'inflammation) pour les amphiboles de Libby (après un jour, 10 mg/m³) et l'amosite (après 18 mois). La portée de ces résultats est cependant limitée dans le contexte de la présente étude étant donné que les auteurs n'ont pas mesuré les effets pulmonaires, mais plutôt les effets systémiques (Kodavanti *et al.*, 2014).

4.4.3 Conclusions concernant les connaissances toxicologiques

En se basant sur les données rapportées dans les articles consultés, les fibres courtes et les fragments de clivage, à fortes doses, peuvent engendrer de l'inflammation, mais en général ils seraient moins actifs que les fibres longues. La dimension et la biopersistance des PMA sont des critères importants affectant leur toxicité, mais d'autres caractéristiques telles leur réactivité de surface et leur composition chimique peuvent également avoir un impact sur leurs effets toxiques. Compte tenu des lacunes mentionnées au regard de la caractérisation des échantillons de PMA utilisés dans le contexte des différentes études, la toxicité des PMA et des fragments de clivage ne peut être écartée hors de tout doute.

5. DISCUSSION

5.1 Cancers et maladies pulmonaires

Dans l'ensemble de la littérature consultée, il existe une relation assez claire entre le travail dans les mines et une augmentation de risque de cancer du poumon et de pneumoconiose (particulièrement la silicose). Cette relation varie selon le type de mine, mais est généralement associée à la durée de travail et à l'exposition aux poussières de mine, et elle est plus forte pour les travailleurs des mines souterraines.

5.1.1 Travailleurs des mines d'or

Pour les mines d'or, des excès statistiquement significatifs de décès par cancer du poumon ont été rapportés dans les études de cinq pays, et parmi quatre d'entre elles, une relation exposition-réponse statistiquement significative a été mise en évidence avec la **durée de travail dans la mine** (de Klerk, N. H. et Musk, 1998; Hnizdo *et al.*, 1997; Kusiak *et al.*, 1991; Peters *et al.*, 2013; Simonato *et al.*, 1994; Steenland et Brown, 1995a). Cependant, dans les deux groupes de travailleurs pour lesquels des analyses ont été effectuées en lien avec la présence de PMA, il n'y avait **pas de relation exposition-réponse avec la concentration de ces PMA** (Kusiak *et al.*, 1991; Steenland et Brown, 1995a). Trois de ces études rapportent quelques cas de cancers du péritoine, de mésothéliome ou encore la présence de plaques pleurales, tous des indicateurs d'exposition à l'amiante; cependant les auteurs ne peuvent écarter une exposition à l'amiante à l'extérieur du travail minier (Kusiak *et al.*, 1991; Lee *et al.*, 1999; Steenland et Brown, 1995a). Une étude australienne rapporte des risques statistiquement significatifs de cancer du poumon et de cancer colorectal, et un excès non statistiquement significatif de mésothéliome, chez les mineurs d'or comparés aux travailleurs de mines d'autres minéraux (Sodhi-Berry *et al.*, 2017). Plusieurs des études montrant un **excès de cancer du poumon chez les mineurs d'or** rapportent une association exposition-réponse avec la concentration en **silice cristalline** des poussières.

En ce qui a trait aux maladies pulmonaires non cancéreuses, les plus souvent rapportées sont les maladies classiquement diagnostiquées chez les mineurs, soient des pneumoconioses, particulièrement la silicose, la tuberculose (fréquente chez les mineurs souterrains du siècle dernier) et les bronchopneumopathies chroniques obstructives (de Klerk, N. H. et Musk, 1998; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1993; Muller *et al.*, 1983; Reid et Sluis-Cremer, 1996; Steenland et Brown, 1995b; Tse *et al.*, 2007). Ces études confirment l'**augmentation de risque d'être atteint d'une maladie pulmonaire** en association avec l'exposition à la **silice cristalline**. **Aucune étude n'a exploré spécifiquement l'association entre ces maladies pulmonaires et la présence de PMA non amiantiformes.**

5.1.2 Travailleurs des mines de fer

Pour les mines de fer, des excès, souvent statistiquement significatifs, de décès ou d'incidence de cancer du poumon ont été rapportés dans plusieurs études de chaque pays, et parmi trois d'entre elles, une relation exposition-réponse statistiquement significative a été mise en évidence avec la **durée de travail dans la mine** (Björ, O. *et al.*, 2013; Chen, S. Y. *et al.*, 1990; Pham, Q.T. *et al.*, 1993). Seules les études américaines ont exploré l'effet de l'exposition aux PMA et elles n'ont pas permis l'observation d'une relation exposition-réponse avec le cancer du

poumon (Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ramachandran, G., Mandel, J.H., 2015; Allen, 2014). Cependant, un excès statistiquement significatif de mésothéliome a été démontré, de même qu'une relation exposition-réponse presque statistiquement significative, avec la concentration de PMA (Lambert *et al.*, 2016). Une étude australienne rapporte un excès non statistiquement significatif de mésothéliome chez les mineurs de fer comparés aux mineurs exposés à d'autres minéraux (Sodhi-Berry *et al.*, 2017).

Les maladies pulmonaires non cancéreuses rapportées sont les mêmes que celles qui affectent les mineurs d'or, mais les auteurs mettent moins l'accent sur ces maladies dans les articles disponibles. Il faut tout de même noter des excès de décès par bronchite chronique et d'autres maladies pulmonaires (Chau *et al.*, 1993; Chen, J. *et al.*, 1992; Hedlund *et al.*, 2004; Hedlund *et al.*, 2008).

5.2 Expositions cancérogènes et fibrogènes dans les mines d'or et de fer

La plupart des études épidémiologiques ne disposaient que de données d'exposition partielles, qui consistaient essentiellement en des mesures de poussières totales ou respirables, pour lesquelles le pourcentage de silice était souvent présenté. Certaines études, particulièrement les études chinoises, ont aussi considéré l'exposition au radon, à l'arsenic et aux HAP (Chen, S. Y. *et al.*, 1990; Chen, W. *et al.*, 2007), de même qu'aux fumées de moteurs diesels (Chau *et al.*, 1993; Icso *et al.*, 1994). Toutes ces substances sont classées comme des cancérogènes reconnus pour le cancer du poumon (IARC, 2012a).

Les données sur la présence de PMA sont plus limitées, mais semblent associées à une augmentation de mésothéliome ou de cancer de la plèvre, notamment dans les études américaines où des fibres de types amphiboles non amiantiformes (Gillam *et al.*, 1976), majoritairement courtes (< 5 µm), ont été mesurées dans la mine d'or Homestake au Dakota du Nord (Brown *et al.*, 1986) et les mines du Mesabi Range au Minnesota (Hwang *et al.*, 2013, 2014).

La silice cristalline est l'agent fibrogène le plus constamment rapporté dans la poussière de mines; elle constitue de 1 à 48 % des poussières respirables (Peters *et al.*, 2017; Steenland et Brown, 1995b). Lorsque des données quantitatives étaient disponibles, elles montraient généralement des effets fibrogènes associés à des conditions d'exposition au-dessus de la valeur limite d'exposition recommandée présentement par l'ACGIH, soit 0,025 mg/m³ (Tse *et al.*, 2007); les études de cohortes de mineurs ayant travaillé dans des atmosphères moins concentrées en silice montrent moins une augmentation du risque de maladie pulmonaire (Steenland et Brown, 1995b).

Un des paramètres importants expliquant l'empoussièrement est le mode d'exploitation (souterrain ou à ciel ouvert). Dans plusieurs études épidémiologiques, les effets délétères sont plus importants dans les mines souterraines, où les concentrations mesurées sont plus élevées (Björ, O. *et al.*, 2013; Peters *et al.*, 2013; Pham, Q.T. *et al.*, 1993).

5.3 Contextes géologiques et exposition aux PMA

L'étude des contextes géologiques d'or et de fer en fonction de la présence de PMA révèle que les gîtes aurifères comprennent généralement une forte proportion de roches volcaniques mafiques dont le métamorphisme est susceptible d'avoir produit des PMA d'amphiboles (Powell, W.G. *et al.*, 1993). Quant aux gîtes ferrifères, dont la majorité se situe sur les marges continentales, certains d'entre eux ont subi des degrés variables de métamorphisme, également associé à la présence de PMA d'amphiboles (Klein, 2005).

Il est également connu que les dépôts de fibres d'amiante se trouvent généralement dans des roches riches en magnésium et souvent en fer, qui ont subi un métamorphisme à relativement faible pression et température. Certains types de roches sont connus pour contenir de l'amiante (serpentinites, roches ultramafiques altérées et certaines roches mafiques, marbres dolomitiques et dolomies métamorphisées, formations de fer métamorphisées, intrusions alcalines et carbonatites) (Van Gosen, 2010).

Une des critiques énoncées par l'Institute of Medicine et le National Research Council des États-Unis au sujet du rapport de NIOSH (NIOSH, 2011) est le manque d'information sur le degré de variation entre les espèces minérales imputable à leurs conditions naturelles de formation ainsi que sur la mesure dans laquelle ces caractéristiques influencent la toxicité des PMA (Nelson, A. R. *et al.*, 2009).

Le rapport d'une expertise menée par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) en France a concerné spécifiquement les PMA (ANSES, 2017). On y apprend qu'en France les serpentines (chrysotile et antigorite notamment) se retrouvent dans la plupart des massifs de roches ultrabasiques (péridotites plus ou moins serpentinisées et serpentinites). Les amphiboles sont associés à des péridotites plus ou moins serpentinisées, à des serpentinites, à des métagabbros magnésiens, à des metabasaltes (spilites, prasinites), à certaines roches ultrabasiques (lherzolites plus ou moins serpentinisées, métapyroxénites), basiques et carbonatées, de même qu'exceptionnellement dans des roches plus siliceuses (diorites, granodiorites, gneiss migmatitiques). En termes de possibilité d'exposition professionnelle aux PMA, le groupe de travail de l'ANSES mentionne tout travail de production et d'utilisation de matériaux naturels, notamment les secteurs d'activité des carrières, de l'exploitation des mines, des travaux publics et de divers ouvrages souterrains en environnement naturel (ANSES, 2017).

Quant à l'exposition potentielle des travailleurs, un rapport d'expertise de l'ANSES sur les fragments de clivage a conclu qu'aucune donnée concernant l'exposition aux PMA, leur présence dans divers matériaux ou la possibilité qu'elles soient émises depuis ces matériaux n'a été considérée pertinente pour évaluer l'exposition professionnelle (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, 2015). Une étude des bases de données françaises de mesures dans l'air a mis en évidence l'absence de mesures de PMA non amiantiformes, en soulignant que quelques mesures d'actinolite-amiante font foi de la possibilité d'exposition dans certaines carrières et sur des chantiers routiers (ANSES, 2017).

5.4 Situation des mines d'or et de fer au Québec

Comme attendu d'après les contextes géologiques, la revue de la littérature confirme la présence de PMA d'amphiboles dans plusieurs sites miniers d'or. Quant aux mines de fer québécoises, même si leur contexte géologique semblait moins favorable que celui du Minnesota, où le degré de métamorphisme est plus faible et donc plus propice à leur formation, des PMA d'amphiboles ont tout de même été répertoriées dans la littérature.

L'analyse pétrographique des échantillons des sites pour lesquels la littérature a révélé la présence de PMA d'amphiboles n'a pas toujours confirmé leur présence. Cette différence expose l'une des limites principales de cette étude, soit l'absence de contrôle sur la localisation géographique des échantillons décrits dans la littérature et observés en laboratoire.

Un autre point concerne l'importance de distinguer la morphologie en aiguilles de celle, prismatique, des PMA d'amphiboles. En effet, une roche contenant des PMA d'amphiboles ayant une morphologie en aiguilles a plus de chance de contenir aussi des fibres alors qu'il serait surprenant d'en trouver dans une roche contenant uniquement des amphiboles prismatiques (comparez les figures 11 et 14 à la figure 12). Cependant, il est possible que les fragments de clivage de cette dernière morphologie aient la taille requise pour être considérés amiantiformes.

Il est aussi intéressant de noter qu'une morphologie en aiguilles et même localement fibreuse a été documentée pour la hornblende. Ainsi, même si ce minéral ne fait pas partie des types d'amiante officiellement reconnus, la présente étude suggère qu'il faudrait le prendre en considération dans les futures études en SST sur les PMA.

Bien que la présence de PMA soit probable dans les mines et projets miniers du Québec, il est impossible de l'affirmer sans des études spécifiques, puisque la géologie de chaque gisement métallifère est unique. Dans les gisements d'or, par exemple, les PMA potentielles se trouvent dans une roche associée au contexte géologique favorable à la minéralisation en or, mais le minerai n'est pas nécessairement associé à ce type de roche. Pour ce qui est des mines de fer, les PMA sont le produit direct d'un métamorphisme moyen des formations de fer. Par contre, la formation d'amphiboles de la série cummingtonite-grunérite est un processus complexe qui dépend de la température, de la pression, de la fugacité d'oxygène et de la composition de la roche (Klein, 2005). Enfin, il est primordial de noter l'absence de lien direct entre le minerai d'or et les PMA d'amphiboles dans les mines d'or québécoises, contrairement au gisement de la mine Homestake pour laquelle les PMA d'amphiboles sont spatialement associées à la minéralisation en or. Ainsi, sauf pour la mine L, où de l'or visible est associé à des PMA d'amphiboles en aiguille ou aciculaires (figure 12), il est impossible de déterminer si les échantillons analysés posent un risque en étant excavés lors de l'extraction du minerai ou s'ils proviennent de zones éloignées de l'excavation.

5.5 Risque potentiel associé aux PMA et aux autres expositions en milieu minier québécois

Le NIOSH procède à l'évaluation des risques professionnels en recueillant trois types d'information : l'identification du danger, l'évaluation de l'exposition sur le lieu de travail et l'évaluation de la relation exposition-réponse concernant les maladies d'intérêt, ce qui permet de caractériser le risque en milieu de travail (National Institute for Occupational Safety and

Health, 2017). Faute de données dans les articles scientifiques recensés, ces informations n'ont été que partiellement analysées dans le contexte de la présente étude.

Identification du danger

La littérature consultée a mis en évidence la présence potentielle de nombreux agents cancérogènes ou fibrogènes dans les mines d'or et de fer, dont la silice cristalline, l'arsenic, les émissions de moteurs diesels, le radon et certaines amphiboles. De plus, comme souligné dans la section précédente, la présence de PMA d'amphiboles a été confirmée dans plusieurs mines d'or québécoises par revue de la littérature et par examen d'échantillons de roches, alors qu'elle n'a été confirmée que dans la littérature pour les mines de fer québécoises. Aucune mention de PMA de serpentines n'a été retrouvée dans les documents consultés.

Évaluation de l'exposition sur le lieu de travail

Malgré que ce qui précède permette de conclure à la présence probable de cancérogènes dans les mines d'or et de fer au Québec, aucune publication scientifique sur leur concentration dans l'air n'était disponible. Des données publiées sur les cancérogènes et fibrogènes auraient permis de comparer les conditions dans les mines québécoises à celles rapportées dans les mines des autres pays. Puisque le secteur des mines fait partie des secteurs d'activité prioritaires quant aux activités d'intervention de l'inspecteurat et du réseau de santé publique québécois, il apparaissait moins nécessaire de vérifier l'exposition, mieux connue, aux autres substances cancérogènes et fibrogènes (silice, radon, arsenic, émissions de moteurs diesels...). Aucune demande n'a donc été faite aux compagnies minières ayant accepté de nous transmettre des échantillons de roches parce que l'intérêt principal de cette activité de recherche portait sur les PMA, non mesurées dans les mines québécoises d'or et de fer.

Évaluation de la relation exposition-réponse concernant les maladies d'intérêt

Plusieurs études épidémiologiques ont rapporté des excès de mortalité et d'incidence de cancers chez les travailleurs des mines d'or et de fer à l'extérieur du Québec, notamment le cancer du poumon pour les deux types de mines et le mésothéliome, ainsi que des excès de fibroses et d'autres maladies pulmonaires. Il a été rapporté chez l'animal qu'une exposition simultanée au quartz et à certaines PMA (notamment chrysotile ou amosite) augmente de façon importante la fibrose et l'apparition de tumeurs chez l'animal (Aust *et al.*, 2011). Les résultats mitigés des études épidémiologiques, pour lesquelles la présence de coexpositions a été prise en considération, et l'existence de fortes corrélations entre ces coexpositions ne permettent pas d'isoler l'effet des PMA, notamment en raison du manque de données spécifiques à ces particules (Chen, W. *et al.*, 2007; McLaughlin *et al.*, 1992). Dans les mines caractérisées par des augmentations de cancer, les auteurs ont notamment mis en évidence un excès de cancer du poumon chez les mineurs d'or (au Dakota, États-Unis, et en Ontario, Canada), mais avec une association non significative avec les PMA, et une augmentation du mésothéliome chez les mineurs de fer (au Minnesota, États-Unis) avec une association statistiquement significative avec les PMA.

À défaut d'études épidémiologiques effectuées chez les mineurs québécois, les données de surveillance des maladies liées à l'amiante reconnues d'origine professionnelle chez les travailleurs des mines d'or et de fer peuvent servir à explorer le risque potentiel associé aux PMA. Une compilation du nombre de cas de mésothéliome acceptés pour indemnisation entre

2000 et 2012 montre que 17 cas provenaient du secteur des mines, sans plus de précisions²¹. Il est cependant probable que la majorité de ces cas concerne des travailleurs des mines d'amiante, car parmi les travailleurs des mines ayant fait une demande d'indemnisation pour mésothéliome entre 1988 et 2003, la presque totalité demeurait dans une des régions où l'on trouve des mines d'amiante (DeGuire et Provencher, 2009).

Le nombre de cas de silicose donne également une indication de l'exposition au quartz. Or, dans un relevé portant sur les années 2000 à 2012, 86 cas de silicose acceptés par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) ont été dénombrés pour différentes catégories de professions, dont 51 cas en lien avec le secteur des mines²². Ces catégories ne fournissent pas d'information sur la nature de la mine, de sorte qu'il est impossible de déterminer le nombre de cas qui proviennent des mines d'or ou de fer. Toutefois quelques observations fragmentaires sur des dépassements possibles des normes incitent à la prévention.

5.6 Remarques méthodologiques

À la connaissance des auteurs, le présent rapport est le premier document utilisant des données minéralogiques pour estimer le potentiel nocif de substances non mesurées dans l'air du milieu de travail minier au Québec. L'utilisation d'approches complémentaires (épidémiologie, expologie et métrologie, hygiène du travail, géologie et toxicologie) a permis d'étayer certains constats et de pallier les limites associées à l'utilisation d'une seule de ces approches.

5.6.1 Revue de la littérature

Un nombre plutôt restreint d'articles ou de rapports scientifiques étaient disponibles, incluant plusieurs études anciennes (publiées avant 1990) et des données d'exposition partielles, pas toujours représentatives. De plus, aucun article portant sur la survenue de maladies ou sur l'exposition des mineurs québécois n'a été retracé. Dans les documents disponibles, il était souvent difficile d'apprécier les résultats de mesure, les méthodes de prélèvement et d'analyse n'étant généralement pas détaillées.

Les études épidémiologiques n'avaient pas toujours la puissance nécessaire pour déceler des excès de maladie : population de travailleurs trop petite, durée de suivi trop courte, étude de maladies rares (p. ex., mésothéliome), ajustement insuffisant pour des facteurs de confusion (p. ex. : consommation de tabac ou d'alcool, facteurs de risque personnels tels que l'obésité, l'histoire familiale, etc.).

Les études d'expologie et d'hygiène du travail publiées sous forme d'articles n'étaient généralement basées que sur quelques mesures non précises de l'exposition : pas de différenciation selon la forme chimique (p. ex., nickel sans précision, alors que les formes solubles et insolubles sont associées à des risques très différents), avec des méthodologies non optimales (p. ex., microscopie optique en contraste de phase au lieu de microscopie électronique).

²¹ Busque, M-A (2015). Valeurs estimées par le Groupe de connaissance et surveillance statistique (GCSS) de l'IRSST à partir des données de la CNESST (2000-2012). Document interne.

²² « Mineurs, carriers, foreurs de puits et travailleurs assimilés, n.c.a. »; « Mineurs et carriers spécialisés dans havage, transport, chargement »; et « Foreurs sur installation rotary et travailleurs assimilés ».

Les rares études toxicologiques disponibles décrivaient insuffisamment les caractéristiques dimensionnelles des particules et leurs méthodes de génération. Tout comme pour les études d'expologie, les méthodes d'analyse utilisées ne différencient pas les fragments de clivage des fibres amiantiformes.

De plus, le contexte de multiexposition, qui caractérise particulièrement le milieu minier, rendait difficile, voire impossible de séparer l'effet des PMA de celui des autres expositions (émissions de moteurs diesels, silice, radon, dinitrotoluène, arsenic, cobalt, dioxyde de soufre, mercure...).

5.6.2 Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique a dû être effectuée avec des échantillons de convenance, soit à partir de collections de roches et de carottes de Polytechnique Montréal, soit sur des échantillons de roches fournies gracieusement par des représentants de mines actives au Québec et de deux mines canadiennes. La localisation exacte des échantillons investigués n'était pas connue. Sauf pour un cas où de l'actinolite aciculaire est adjacente à de l'or visible (figure 14), il était impossible d'affirmer que les échantillons investigués faisaient partie des zones minières exploitées.

6. CONCLUSION

L'intérêt renouvelé pour l'exploration de nouveaux gisements d'or et de fer dans le Nord-du-Québec laisse prévoir une augmentation du nombre de travailleurs de ces secteurs, d'où la pertinence de procéder à une première évaluation de l'exposition dans ces milieux. Pour ce faire, une étude originale, alliant les disciplines de l'épidémiologie, de l'expologie, de la toxicologie et de la géologie, a été entreprise. Bien que la présence de PMA soit probable dans les roches des mines et projets miniers du Québec, il est impossible d'affirmer que les travailleurs sont exposés sans des mesures d'exposition spécifiques dans l'air, puisque la géologie de chaque gisement métallifère est unique et que l'exposition des mineurs varie selon l'emplacement exact de l'excavation du minerai.

Il est également difficile d'évaluer les effets sanitaires associés à l'exposition aux PMA elles-mêmes, à l'exception du mésothéliome chez les travailleurs exposés à la taconite, en raison de la présence simultanée dans les mines d'autres agents fibrogènes ou cancérogènes. La contribution du quartz est évidente et celle de l'amiante probable. L'arsenic, les émissions de moteurs diesels et le radon ont aussi été évoqués, mais la mesure de l'exposition nécessiterait différentes méthodes d'échantillonnage selon leurs propriétés physico-chimiques. De plus, l'effet sanitaire de l'exposition simultanée à plusieurs contaminants, par exemple les PMA et la silice cristalline, est pratiquement inconnu.

La présence de PMA documentée dans certaines mines de fer et d'or québécoises montre qu'une exposition à ces particules est plausible. Il serait donc approprié d'effectuer des études pétrographiques systématiques dans ces mines afin d'identifier les zones susceptibles de contenir des PMA et, le cas échéant, d'ajouter des mesures de fibres à la surveillance de la silice cristalline, dans le contexte d'un programme d'échantillonnage de l'air. En l'absence de mesures de fibres dans les mines, il est prudent de présumer de leur présence et de préconiser des niveaux d'exposition les plus faibles possible.

7. RECOMMANDATIONS

Les constats mentionnés dans les sections précédentes appuient des recommandations en matière de prévention de l'exposition aux agents cancérogènes et fibrogènes ainsi que l'acquisition de connaissances à l'égard du milieu de travail minier. Malgré que la composition des poussières totales ou respirables ne soit pas déterminée, il est fort probable qu'elles contiennent des agents cancérogènes et fibrogènes en milieu minier. En vue de prévenir les cancers et la fibrose pulmonaire, les substances et agents qui devraient être surveillés sont notamment :

- la silice cristalline,
- l'arsenic,
- les émissions de moteurs diesels,
- les fibres et autres particules minérales allongées (PMA),
- les poussières totales (inhalables) ou respirables,
- le radon.

7.1 Prévention

- S'assurer, minimalement, du respect des normes des règlements sur la santé et la sécurité du travail applicables au Québec (tableau 12), qui prévoient généralement que l'exposition aux agents cancérogènes doit être réduite au minimum. À cet effet, viser à réduire les niveaux d'exposition en deçà des valeurs réglementaires ou recommandées les plus contraignantes (tableau 12).
- Maîtriser l'exposition aux substances et agents nocifs en utilisant les principes classiques de maîtrise recommandés en hygiène du travail : substitution, principes d'ingénierie (ventilation générale, téléopération de machinerie, cabines isolées, entretien préventif des moteurs...), moyens administratifs (limite du nombre de machines fonctionnant au diesel...), et en dernier recours, port d'équipement de protection individuelle.
- En l'absence de certitude concernant les effets nocifs des PMA et en raison de leurs similitudes structurelles avec les fibres d'amiante, il est prudent de préconiser l'exposition la plus faible possible. Puisqu'il n'existe pas de valeur d'exposition réglementaire pour les PMA, il nous apparaît souhaitable de proposer les valeurs limites s'appliquant aux fibres d'amiante.

7.2 Programme d'échantillonnage de l'air

- S'assurer de maintenir un programme d'échantillonnage de l'air ciblé concernant les agents cancérogènes ou fibrogènes mentionnés plus haut, notamment pour les postes les plus à risque (broyage, concassage, entretien et réparation...).

- Instaurer un programme d'analyse pétrographique des zones visées pour l'exploitation afin d'identifier la présence d'amphiboles ou autres PMA (amiantiformes ou fragments de clivage).
- Considérer, lors des mesures de PMA, les fibres de différentes tailles (OMS²³, fibres courtes...), réglementées ou non, déterminées par des méthodes analytiques permettant l'identification plus précise des fibres que la MOCP.

7.3 Programme de recherche

- La constitution d'une base de données d'exposition créée à partir de données de mesure publiques et privées favoriserait l'évaluation du risque dans le contexte d'études épidémiologiques et de surveillance de la santé des mineurs.
- Étant donné le contexte de multiexposition caractéristique du milieu minier, il faut mener des études sur l'effet combiné de plusieurs contaminants, particulièrement entre la silice cristalline et les PMA.
- Pour mieux évaluer la tendance du nombre de cas de silicose chez les mineurs, par exemple, il faudrait avoir accès au dossier individuel et à l'histoire de cas de ces travailleurs, ce qui exigerait une étude épidémiologique approfondie, mais qui permettrait de faire progresser les connaissances.

²³ Selon l'ANSES, « les fibres dites OMS correspondent aux fibres dont la longueur est supérieure à 5 µm, le diamètre est compris entre 0,2 et 3 µm (taille observable en MOCP) et dont le rapport longueur sur diamètre est supérieur à 3.»

Tableau 12. Valeurs limites réglementaires pour les six contaminants ciblés particulièrement dans les mines d'or et de fer

Contaminant [Numéro CAS]	Réglementation québécoise		Réglementations/recommandations internationales	
	[Règlement] VEMP/ Recommandation	Notation et remarques	Pays ou organisme	Valeurs réglementées ou recommandées les plus basses***
Arsenic	[RSST] 0,1 mg/m ³		Japon Allemagne (fraction respirable, valeur proposée pour risque de cancer acceptable)	0,003 mg/m ³ 0,00083 mg/m ³
Émissions de moteurs diesels dans les mines	[RSSM] 0,4 mg/m ³	Carbone total respirable	Autriche (carbone élémentaire respirable, mines souterraines) Autriche (autres milieux)	0,3 mg/m ³ 0,1 mg/m ³
<u>Fibres/ particules minérales allongées</u> Attapulгите Wollastonite <u>Amiante</u> Actinolite, anthophyllite, chrysotile, trémolite Amosite, crocidolite	[RSST] 1 fibre/cm ³ 5 fibres/cm ³ 1 fibre/cm ³ 0,2 fibre/cm ³	C1, EM Pr, note 1	<u>Fibres minérales sans précision</u> Finlande Israël <u>Amiante</u> France, Pays-Bas, Suisse Japon (pour éviter excès de cancer vie durant)	1 fibre/cm ³ 1 fibre/cm ³ 0,01 fibre/cm ³ 0,003 fibre/cm ³
<u>Poussières</u> Totales (inhalables) Respirables	[RSST]* 10 mg/m ³ --	Pt, note 1	Allemagne (MAK) (poussière granulaire biopersistante, densité de 1 g/cm ³)	4 mg/m ³ 0,3 mg/m ³
Radon et ses produits de filiation (personne autre qu'un travailleur du secteur nucléaire; dose efficace) (corps entier, par année civile)	[CCSN] 1 mSv**	Niveau le plus faible qu'il soit raisonnablem ent possible d'atteindre	CNPR (mines et la majorité des édifices) CNPR (à l'intérieur lors de travail physique et travail dans des caves touristiques)	3 mSv/mJ h/m ³ (~10 mSv par WLM) 6 mSv/mJ h/m ³ (~20 mSv par WLM)

Contaminant [Numéro CAS]	Réglementation québécoise		Réglementations/recommandations internationales	
	[Règlement] VEMP/ Recommandation	Notation et remarques	Pays ou organisme	Valeurs réglementées ou recommandées les plus basses***
Silice cristalline ou quartz [14808-60-7]	[RSST] 0,1 mg/m ³	Pr, C2, EM	USA (recommandation ACGIH) USA (NIOSH) Finlande Corée du Sud	0,025 mg/m ³ 0,05 mg/m ³ 0,05 mg/m ³ 0,05 mg/m ³

Pr, poussière respirable (correspondant à un diamètre médian de 4 µm avec un écart-type de 1,5); C1, effet cancérigène démontré chez l'humain; C2, effet cancérigène soupçonné chez l'humain; EM, substance dont l'exposition doit être réduite au minimum conformément à l'article 42 du RSST; Pt, poussière totale; Note 1, ne contenant pas d'amiante et dont le pourcentage de silice cristalline est inférieur à 1%; VEMP, valeur d'exposition moyenne pondérée.

RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail, Loi sur la santé et la sécurité du travail. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>.

RSSM : Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines, Loi sur la santé et la sécurité du travail.

<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/S-2.1,%20r.%2014/>. CCSN : Commission canadienne de sûreté nucléaire. CNPR, Commission internationale de protection radiologique.

* Au Québec, l'appellation correspondant aux poussières totales est « Poussières non classifiées autrement (PNCA) ».

** 1 mSv correspond à la dose subie par le corps entier à la suite d'une exposition à 200 Bq/m³ pendant 170 heures de travail annuellement.

*** En date du 15 mai 2018, selon les données pour les divers contaminants, sur le site allemand GESTIS (http://limitvalue.ifa.dguv.de/WebForm_ueliste2.aspx)

RÉFÉRENCES

- Addison, J. et McConnell, E. E. (2008). A review of carcinogenicity studies of asbestos and non-asbestos tremolite and other amphiboles. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S187-S199. doi: 10.1016/j.yrtph.2007.10.001
- Adelroth, E., Hedlund, U., Blomberg, A., Helleday, R., Ledin, M. C., Levin, J. O., ... et Jarvholm, B. (2006). Airway inflammation in iron ore miners exposed to dust and diesel exhaust. *European Respiratory Journal*, 27(4), 714-719. doi: 10.1183/09031936.06.00034705
- Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail. (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 : réévaluation des données toxicologiques, métrologiques et épidémiologiques dans l'optique d'une évaluation des risques sanitaires en population générale et professionnelle : avis de l'AFSSET, rapport d'expertise collective*. Maisons-Alfort, France: AFSSET.
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2015). *Effets sanitaires et identification des fragments de clivage d'amphiboles issus des matériaux de carrière : avis de l'ANSES et rapport d'expertise collective*. Maisons-Alfort, France: ANSES.
- Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail. (2017). *Particules minérales allongées : identification des sources d'émission et proposition de protocoles de caractérisation et de mesures : avis de l'ANSES et rapport d'expertise collective*. Maisons-Alfort, France: ANSES.
- Agency for Toxic Substances & Disease Registry. (2001). *Toxicological profile for asbestos*. Atlanta, GA: ATSDR.
- Allen, E. M., Alexander, B.H., MacLehose, R.F., Nelson, H.H., Ramachandran et G., Mandel, J.H. (2015). Cancer incidence among Minnesota taconite mining industry workers. *Annals of Epidemiology*, 25(11), 811-815. doi: 10.1016/j.annepidem.2015.08.003
- Allen, E. M., Alexander, B. H., MacLehose, R. F., Nelson, H. H., Ryan, A. D., Ramachandran, G. et Mandel, J. H. (2015). Occupational exposures and lung cancer risk among Minnesota taconite mining workers. *Occupational & Environmental Medicine*, 72(9), 633-639. doi: 10.1136/oemed-2015-102825
- Allen, E. M., Alexander, B. H., MacLehose, R. F., Ramachandran, G. et Mandel, J. H. (2014). Mortality experience among Minnesota taconite mining industry workers. *Occupational & Environmental Medicine*, 71(11), 744-749. doi: 10.1136/oemed-2013-102000
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2018). *2018 TLVs and BEIs: Based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices*. Cincinnati, OH: ACGIH.
- Asgharian, B., Owen, T. P., Kuempel, E. D. et Jarabek, A. M. (2018). Dosimetry of inhaled elongate mineral particles in the respiratory tract: The impact of shape factor. *Toxicology and Applied Pharmacology*. doi: 10.1016/j.taap.2018.05.001
- Aust, A. E., Cook, P. M. et Dodson, R. F. (2011). Morphological and chemical mechanisms of elongated mineral particle toxicities. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 14(1-4), 40-75.
- Axten, C. W. et Foster, D. (2008). Analysis of airborne and waterborne particles around a taconite ore processing facility. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S66-S72.
- Baize, D. (2004). *Petit lexique de pédologie*. Paris, France: INRA.
- Ballan, G., Del Brocco, A., Loizzo, S., Fabbri, A., Maroccia, Z., Fiorentini, C. et Travaglione, S. (2014). Mode of action of fibrous amphiboles: The case of Biancavilla (Sicily, Italy). *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita*, 50(2), 133-138. doi: 10.4415/ann_14_02_05
- Bandyayera, D. et Fliszár, A. (2007). *Géologie de la région de la baie Kasipasikatch (33C09) et du lac Janin (33C16)* (Publication n° RP 2007-05). Québec, QC: Ressources naturelles et Faune Québec. Tiré de http://mern.gouv.qc.ca/publications/mines/public/RP_2007-05.pdf
- Bandyayera, D. et Lacoste, P. (2009). *Géologie de la région du lac de Rotis (33C10), du lac Bernou (33C11) et du lac Boyd (33C15)* (Publication n° RP 2009-06). Québec, QC: Ressources

- naturelles et Faune Québec. Tiré de ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Index/index_1025543.htm
- Bandyayera, D., Rhéaume, P., Maurice, C., Bédard, E., Morfin, S. et Sawyer, E. W. (2010). *Synthèse géologique du secteur du réservoir Opinaca, Baie-James* (Publication n° RG 2010-02). Québec, QC: Géologie Québec, Ressources naturelles et Faune Québec. Tiré de ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Index/index_1062716.htm
- Bazin, R., Chouteau, M. et Legault, J. P. (1984). *Étude géotectonique de la ceinture volcanique de l'Abitibi à l'aide de la méthode magnétotellurique : rapport final*. Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Beaudoin, A. et Trudel, P. (1989). *Géologie des mines New Alger, Wood Cadillac, Central Cadillac, Pandora, Lapa Cadillac et Mic Mac* (Publication n° MB 88-25). Québec, QC: ministère de l'énergie et des ressources
- Beaumier et M., Kirouac, F. (1989). *Utilisation du Bacillus cereus dans les sols au-dessus du gisement de Monique et son utilité pour l'exploration de l'or* (Publication n° MB 89-45). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources
- Bélanger, J. (1979). *Caractérisation pétrographique et géochimique de la zone cupro-zincifère "8-5", et de ses roches encaissantes, secteur Cooke, mines Opémiska, Chapais*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC).
- Belkibir, A. et Hubert, C. (1995). Geology and structure of a sulfide-rich gold deposit: An example from the Mouska gold mine, Bousquet District, Canada. *Economic Geology*, 90(5), 1064-1079. doi: 10.2113/gsecongeo.90.5.1064
- Belkibir, A., Hubert, C. et Hoy, L. D. (2004). Gold emplacement and hydrothermal alteration in metabasic rocks at the Mouska Mine, Bousquet District, Abitibi, Quebec, Canada. *Canadian Mineralogist*, 42, 1079-1096. doi: 10.2113/gscanmin.42.4.1079
- Bergdahl, I. A., Jonsson, H., Eriksson, K., Damber, L. et Järholm, B. (2010). Lung cancer and exposure to quartz and diesel exhaust in Swedish iron ore miners with concurrent exposure to radon. *Occupational & Environmental Medicine*, 67(8), 513-518. doi: 10.1136/oem.2009.047456
- Bergeron, M. et Dompierre, F. (1993). *Rapports des géologues résidents sur l'activité minière régionale 1992* (Rapport n° DV 93-01). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources. Tiré de ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Index/index_0187754.html
- Björ, B., Burström, L., Eriksson, K., Jonsson, H., Nathanaelsson, L. et Nilsson, T. (2010). Mortality from myocardial infarction in relation to exposure to vibration and dust among a cohort of iron-ore miners in Sweden. *Occupational & Environmental Medicine*, 67(3), 154-158. doi: 10.1136/oem.2009.046599
- Björ, B., Burström, L., Jonsson, H., Nathanaelsson, L., Damber, L. et Nilsson, T. (2009). Fifty-year follow-up of mortality among a cohort of iron-ore miners in Sweden, with specific reference to myocardial infarction mortality. *Occupational & Environmental Medicine*, 66(4), 264-268.
- Björ, O., Jonsson, H., Damber, L., Wahlstrom, J. et Nilsson, T. (2013). Reduced mortality rates in a cohort of long-term underground iron-ore miners. *American Journal of Industrial Medicine*, 56(5), 531-540.
- Blackburn, D. et Raymond, D. (2010). *Ruée vers le fer annoncée!* Québec, QC: Énergie et Ressources naturelles Québec. Tiré de <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2010-06/fer.asp>
- Bleeker, W. (2015). Synorogenic gold mineralization in granite-greenstone terranes: The deep connection between extension, major faults, synorogenic clastic basins, magmatism, thrust inversion, and long-term preservation. Dans B. Dubé et P. Mercier-Langevin (Édit.), *Targeted geoscience initiative 4: Contributions to the understanding of Precambrian lode gold deposits and implications for exploration* (p. 25–47). Ottawa, ON: Minister of Natural Resources Canada.
- Bolle, O., Charlier, B., Bascou, J., Diot, H. et McEnroe, S. A. (2014). Anisotropy of magnetic susceptibility versus lattice- and shape-preferred orientation in the Lac Tio hemo-ilmenite ore body (Grenville province, Quebec). *Tectonophysics*, 629, 87-108. doi: 10.1016/j.tecto.2014.01.012
- Brown, D. P., Kaplan, S. D., Zumwalde, R. D., Kaplowitz, M. et Archer, V. E. (1986). Retrospective cohort mortality study of underground gold mine workers. Dans D. F. Goldsmith, D. M. Winn et C. M. Shy (Édit.), *Silica, silicosis, and cancer*. New York, NY: Praeger Publications.
- Caddey, S. W., Bachman, R. L., Campbell, T. J., Reid, R. R. et Otto, R. P. (1991). The Homestake gold mine, an early Proterozoic iron-formation-hosted gold deposit, Lawrence County, South Dakota. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 1857(J), J2-J65.

- Calvert, G. M., Steenland, K. et Palu, S. (1997). End-stage renal disease among silica-exposed gold miners: A new method for assessing incidence among epidemiologic cohorts. *Journal of the American Medical Association*, 277(15), 1219-1223.
- Cao, Y., Du, Y., Pang, Z., Gao, F., Du, Y. et Liu, X. (2016). Iron transport and deposition mechanisms in the Taochong iron-rich skarn deposit, Middle–Lower Yangtze Valley, Eastern China. *Ore Geology Reviews*, 72, 1037-1052. doi: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.001
- Carpenter, R. L. et Duke, N. A. (2004). Geological setting of the West Meliadine gold deposits, Western Churchill province, Nunavut, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 13(1-4), 49-65. doi: 10.2113/gsemg.13.1-4.49
- Case, B. W. (1991). On talc, tremolite, and tergitersation. Ter-gi-ver-sate: 2: Tto use subterfuges. *British Journal of Industrial Medicine*, 48(5), 357-359.
- Case, B. W., Abraham, J. L., Meeker, G., Pooley, F. D. et Pinkerton, K. E. (2011). Applying definitions of "asbestos" to environmental and "low-dose" exposure levels and health effects, particularly malignant mesothelioma. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 14(1-4), 3-39. doi: 10.1080/10937404.2011.556045
- Chabot, F. (1998). Minéralisation aurifère dans le pluton de Bourlamaque : la mine Beaufor. Dans P. Pilote, J. Moorhead et W. Mueller (Édit.), *Développement d'un arc volcanique, la région de Val d'Or, ceinture de l'Abitibi-volcanologie physique et évolution métallogénique : guide d'excursion A2* (p. 59-64). Québec, QC: Association géologique du Canada/Association minéralogique du Canada.
- Chau, N., Benamghar, L., Pham, Q. T., Teculescu, D., Rebstock, E. et Mur, J. M. (1993). Mortality of iron miners in Lorraine (France): Relations between lung function and respiratory symptoms and subsequent mortality. *British Journal of Industrial Medicine*, 50(11), 1017-1031. doi: 10.1136/oem.50.11.1017
- Chen, J., McLaughlin, J. K., Zhang, J. Y., Stone, B. J., Luo, J., Chen, R. A., ...Hearl, F. J. (1992). Mortality among dust-exposed Chinese mine and pottery workers. *Journal of Occupational Medicine*, 34(3), 311-316.
- Chen, S. Y., Hayes, R. B., Liang, S. R., Li, Q. G., Stewart, P. A. et Blair, A. (1990). Mortality experience of hematite mine workers in China. *British Journal of Industrial Medicine*, 47(3), 175-181.
- Chen, S. Y., Hayes, R. B., Wang, J. M., Liang, S. R. et Blair, A. (1989). Nonmalignant respiratory disease among hematite mine workers in China. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 15(5), 319-322.
- Chen, W., Bochmann, F. et Sun, Y. (2007). Effects of work related confounders on the association between silica exposure and lung cancer: A nested case-control study among Chinese miners and pottery workers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 80(4), 320-326. doi: 10.1007/s00420-006-0137-0
- Chown, E. H., Daigneault, R., Mueller, W. et Mortensen, J. K. (1992). Tectonic evolution of the Northern Volcanic Zone, Abitibi belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29(10), 2211-2225. doi: 10.1139/e92-175
- Churchyard, G. J., Ehrlich, R., Pemba, L., Dekker, K., Vermeijs, M., White, N. et Myers, J. (2004). Silicosis prevalence and exposure-response relations in South African goldminers. *Occupational & Environmental Medicine*, 61(10), 811-816. doi: 10.1136/oem.2003.010967
- Clark, T. (1994). Géologie et gîtes de l'Orogène du Nouveau Québec et de son arrière-pays. Dans M. Hocq (Édit.), *Géologie du Québec* (p. 47-60). Québec, QC: Publications du Québec.
- Clarke, P. J. (1967). *Rapport géologique 129 : région des lacs Gras et Félix, comté de Saguenay* (Rapport n° 129). Québec, QC: ministère des Richesses naturelles.
- Clarke, P. J. (1977). *Normanville area, Saguenay County : Final report* (Rapport n° DP-465). Québec, QC: ministère des Richesses naturelles.
- Coffin, D. L., Palekar, L. D. et Cook, P. M. (1983). Correlation of in vitro and in vivo methods by means of mass dose and fiber distribution for amosite and fibrous ferroactinolite. *Environmental Health Perspectives*, 51, 49-53.
- Cook, P. M., Palekar, L. D. et Coffin, D. L. (1982). Interpretation of the carcinogenicity of amosite asbestos and ferroactinolite on the basis of retained fiber dose and characteristics in vivo. *Toxicology Letters*, 13(3), 151-158. doi: 10.1016/0378-4274(82)90203-X
- Cook, P. M., Swintek, J., Dawson, T. D., Chapman, D., Etterson, M. A. et Hoff, D. (2016). Quantitative structure-mesothelioma potency model optimization for complex mixtures of elongated particles in

- rat pleura: A retrospective study. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 19(5-6), 266-288. doi: 10.1080/10937404.2016.1195326
- Cooper, W. C., Wong, O. et Graebner, R. (1988). Mortality of workers in two Minnesota taconite mining and milling operations. *Journal of Occupational Medicine*, 30(6), 506-511.
- Cooper, W. C., Wong, O., Trent, L. S. et Harris, F. (1992). An updated study of taconite miners and millers exposed to silica and non-asbestiform amphiboles. *Journal of Occupational Medicine*, 34(12), 1173-1180.
- Cyphert, J. M., Nyska, A., Mahoney, R. K., Schladweiler, M. C., Kodavanti, U. P. et Gavett, S. H. (2012). Sumas Mountain chrysotile induces greater lung fibrosis in Fischer 344 rats than Libby amphibole, El Dorado tremolite, and Ontario ferroactinolite. *Toxicological Sciences*, 130(2), 405-415.
- Daigneault, R., Mueller, W. U. et Chown, E. H. (2002). Oblique Archean subduction: Accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transpression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Research*, 115(1), 261-290. doi: 10.1016/S0301-9268(02)00012-8
- Davis, J. M., Addison, J., McIntosh, C., Miller, B. G. et Niven, K. (1991). Variations in the carcinogenicity of tremolite dust samples of differing morphology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 643, 473-490.
- de Klerk, N. H., Ambrosini, G. L., Pang, S. C. et Musk, A. W. (2002). Silicosis compensation in Western Australian gold miners since the introduction of an occupational exposure standard for crystalline silica. *The Annals of Occupational Hygiene*, 46(8), 687-692.
- de Klerk, N. H. et Musk, A. W. (1998). Silica, compensated silicosis, and lung cancer in Western Australian goldminers. *Occupational & Environmental Medicine*, 55(4), 243-248.
- de Klerk, N. H., Musk, A. W., Tetlow, S., Hansen, J. et Eccles, J. L. (1995). Preliminary study of lung cancer mortality among Western Australian gold miners exposed to silica. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 21(Suppl 2), 66-68.
- Debreil, J.-A. (2014). *Évolution volcanologique et chimico-stratigraphique du district minier de Matagami, sous-province de l'Abitibi, Québec*. (Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec, QC).
- DeGuire, L. et Provencher, S. (2009). *Étude des nouveaux cas de maladies professionnelles pulmonaires reliées à l'exposition à l'amiante au Québec : 1988-2003*. Québec, QC: Institut national de santé publique du Québec.
- Drasch, G., Bose-O'Reilly, S., Beinhoff, C., Roeder, G. et Maydl, S. (2001). The Mt. Diwata study on the Philippines 1999: Assessing mercury intoxication of the population by small scale gold mining. *Science of the Total Environment*, 267(1-3), 151-168.
- Dresser, J. A. et Denis, T. C. (1951). *Géologie économique* (Rapport n° 20). Québec, QC: ministère des Mines.
- Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Hannington, M., Davis, D. et Lafrance, B. (2004). *Le gisement de sulfure massifs aurifères volcanogènes LaRonde, Abitibi, Québec : altération, minéralisations et implications pour l'exploitation* (Publication n° MB 2004-03). Québec, QC: ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parc du Québec
- Dugas, J. et Hogg, W. A. (1962). An outline of the Rouyn-Noranda area, N.W. Quebec. *Canadian Mining Journal*, 83(4), 101-104.
- Eakins, P. R. (1962). *Caractères géologiques des gisements aurifères du district de Malartic, comté d'Abitibi-Est* (Rapport n° 99). Québec, QC: ministère des Richesses naturelles.
- Eckstrand, O. R., Sinclair, W. D. et Thorpe, R. I. (1995). *Géologie des types de gîtes minéraux du Canada* (vol. 8). Ottawa, ON: Ressources naturelles Canada, Commission géologique du Canada.
- Finnegan, J. R. et Mandel, J. H. (2014). *Minnesota taconite workers health study: Final report to the legislature*. Minneapolis, MN: University of Minnesota School of Public Health. Tiré de http://taconiteworkers.umn.edu/news/documents/Taconite_FinalReport_120114.pdf
- Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F. et Platevoet, B. (2014). *Dictionnaire de géologie* (8^e éd.). Paris, France: Dunod.
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R. et Galley, A. G. (2005). Volcanogenic massive sulfide deposits. Dans J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb et J. P. Richards (Édit.),

- Economic geology: One hundredth anniversary volume, 1905-2005* (p. 523-560). Littleton, CO: Society of Economic Geologists.
- Franklin, J. M., Sangster, D. F. et Lydon, J. W. (1981). Volcanic-associated massive sulfide deposits. Dans B. J. Skinner (Édit.), *Economic geology: Seventy-fifth anniversary volume, 1905-1980* (p. 485-627). New Haven, CT: Society of Economic Geologists.
- French, B. M. (1968). *Progressive contact metamorphism of the Biwabik iron-formation, Mesabi Range, Minnesota* (Publication n° 45). Minneapolis, MN: University of Minnesota. Tiré de <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/57071>
- Gagné, L. (2000). *Exposition professionnelle aux poussières respirables et au quartz respirable dans les mines métalliques du Nord-Ouest québécois*. (Thèse de doctorat, Université McGill, Montréal, QC). Tiré de http://digitool.library.mcgill.ca/R/?func=dbin-jump-full&object_id=36932&local_base=GEN01-MCG02
- Gamble, J. F. et Gibbs, G. W. (2008). An evaluation of the risks of lung cancer and mesothelioma from exposure to amphibole cleavage fragments. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S154-S186. doi: 10.1016/j.yrtph.2007.09.020
- Gillam, J. D., Dement, J. M., Lemen, R. A., Wagoner, J. K., Archer, V. E. et Blejer, H. P. (1976). Mortality patterns among hard rock gold miners exposed to an asbestiform mineral. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 271(1), 336-344.
- Girard, M.-J. (1985). *Géologie du dépôt aurifère Monique, Canton de Louvicourt*. Communication présentée à Réunion annuelle 1985 de l'Association des prospecteurs du Québec.
- Gourcerol, B., Thurston, P. C., Kontak, D. J., Côté-Mantha, O. et Biczok, J. (2015). *Distinguishing primary and mineralization-related signatures of chert from the banded iron-formation-host gold deposits at Musselwhite, Ontario and Meadowbank, Nunavut*. Ottawa, ON: Ressources naturelles Canada.
- Hammouche, H., Boszczuk, P. et Roy, P. (2010). *Geologie des feuilletts Île Bancroft (32F12-200-0202) et lac MacIvor (32F13-200-0101), région de Matagami* (Rapport n° RP 2010-01). Québec, QC: ministère des Ressource naturelles et de la Faune Québec. Tiré de ftp://ftp.mrnf.gouv.qc.ca/Public/Bibliointer/Index/index_1023411.htm
- Hannington, M. D., Ronde, C. E. J. et Petersen, S. (2005). Sea-floor tectonics and submarine hydrothermal systems. Dans J. W. Hedenquist, J. F. H. Thompson, R. J. Goldfarb et J. P. Richards (Édit.), *Economic geology: One hundredth anniversary volume, 1905-2005* (p. 111-141). Littleton, CO: Society of Economic Geologists.
- Hedlund, U., Jarvholm, B. et Lundback, B. (2004). Respiratory symptoms and obstructive lung diseases in iron ore miners: Report from the obstructive lung disease in northern Sweden studies. *European Journal of Epidemiology*, 19(10), 953-958.
- Hedlund, U., Järholm, B. et Lundbäck, B. (2006). Persistence of respiratory symptoms in ex-underground iron ore miners. *Occupational Medicine*, 56(6), 380-385.
- Hedlund, U., Jonsson, H., Eriksson, K. et Järholm, B. (2008). Exposure-response of silicosis mortality in Swedish iron ore miners. *The Annals of Occupational Hygiene*, 52(1), 3-7. doi: 10.1093/annhyg/mem057
- Hessel, P. A., Sluis-Cremer, G. K. et Hnizdo, E. (1990). Silica exposure, silicosis, and lung cancer: A necropsy study. *British Journal of Industrial Medicine*, 47(1), 4-9.
- Higgins, I. T., Glassman, J. H., Oh, M. S. et Cornell, R. G. (1983). Mortality of reserve mining company employees in relation to taconite dust exposure. *American Journal of Epidemiology*, 118(5), 710-719.
- Hnizdo, E., Baskind, E. et Sluis-Cremer, G. K. (1990). Combined effect of silica dust exposure and tobacco smoking on the prevalence of respiratory impairments among gold miners. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 16(6), 411-422.
- Hnizdo, E. et Murray, J. (1998). Risk of pulmonary tuberculosis relative to silicosis and exposure to silica dust in South African gold miners. *Occupational & Environmental Medicine*, 55(7), 496-502.
- Hnizdo, E., Murray, J. et Klempman, S. (1997). Lung cancer in relation to exposure to silica dust, silicosis and uranium production in South African gold miners. *Thorax*, 52(3), 271-275.
- Hnizdo, E. et Sluis-Cremer, G. K. (1991). Silica exposure, silicosis, and lung cancer: A mortality study of South African gold miners. *British Journal of Industrial Medicine*, 48(1), 53-60.
- Hnizdo, E. et Sluis-Cremer, G. K. (1993). Risk of silicosis in a cohort of white South African gold miners. *American Journal of Industrial Medicine*, 24(4), 447-457.

- Huang, S. X., Jaurand, M. C., Kamp, D. W., Whysner, J. et Hei, T. K. (2011). Role of mutagenicity in asbestos fiber-induced carcinogenicity and other diseases. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 14(1-4), 179-245.
- Hubaux, R., Becker-Santos, D. D., Enfield, K. S., Lam, S., Lam, W. L. et Martinez, V. D. (2012). Arsenic, asbestos and radon: Emerging players in lung tumorigenesis. *Environmental Health*, 11(1), 89. doi: 10.1186/1476-069x-11-89
- Hwang, J. (2013). *Assessing present-day and historical exposures of workers to taconite dust in the iron mining industry in Northeastern Minnesota*. (Thèse de doctorat, University of Minnesota, Minneapolis, MN).
- Hwang, J., Ramachandran, G., Raynor, P. C., Alexander, B. H. et Mandel, J. H. (2013). Comprehensive assessment of exposures to elongate mineral particles in the taconite mining industry. *The Annals of Occupational Hygiene*, 57(8), 966-978.
- Hwang, J., Ramachandran, G., Raynor, P. C., Alexander, B. H. et Mandel, J. H. (2014). The relationship between various exposure metrics for elongate mineral particles (EMP) in the taconite mining and processing industry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(9), 613-624. doi: 10.1080/15459624.2014.890287
- Icso, J., Szollosova, M. et Sorahan, T. (1994). Lung cancer among iron ore miners in east Slovakia: A case-control study. *Occupational & Environmental Medicine*, 51(9), 642-643. Tiré de <http://oem.bmj.com/content/51/9/642.full.pdf>
- Ilgren, E. B. (2004). The biology of cleavage fragments: A brief synthesis and analysis of current knowledge. *Indoor and Built Environment*, 13(5), 343-356. doi: 10.1177/1420326X04047563
- Imreh, L. et Trudel, P. (1990). *Considérations typologiques et mnétallogéniques sur les gisements aurifères du district de Val-d'Or* (Publication n° MB 89-63). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources
- International Agency for Research on Cancer. (2012a). Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite and anthophyllite). Dans *Arsenic, metals, fibres, and dusts* (p. 219-309). Lyon, France: IARC.
- International Agency for Research on Cancer. (2012b). *Radiation* (vol. 100D). Lyon, France: IARC.
- International Agency for Research on Cancer. (2014). *Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes* (vol. 105). Lyon, France: IARC.
- Janvier, V., Castonguay, S., Mercier-Langevin, P., Dubé, B., McNicoll, V., Pehrsson, S., ...Côté-Mantha, O. (2015). *Preliminary results of the geology of the Portage deposit, Meadowbank gold mine, Churchill Province, Nunavut*. Ottawa, ON: Ressources naturelles Canada.
- Jébrak, M. et Marcoux, E. (2008). *Géologie des ressources minérales*. Québec, QC: ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Jirsa, M. A., Miller, J. D., Jr. et Morey, G. B. (2008). Geology of the Biwabik iron formation and Duluth complex. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S5-S10. doi: 10.1016/j.yrtph.2007.09.009
- Jonsson, H., Bergdahl, I. A., Akerblom, G., Eriksson, K., Andersson, K., Kagstrom, L., ...Damber, L. (2010). Lung cancer risk and radon exposure in a cohort of iron ore miners in Malmberget, Sweden. *Occupational & Environmental Medicine*, 67(8), 519-525. doi: 10.1136/oem.2009.047449
- Kilian, T. M., Chamberlain, K. R., Evans, D. A. D., Bleeker, W. et Cousens, B. L. (2016). Wyoming on the run: Toward final Paleoproterozoic assembly of Laurentia. *Geology*, 44(10), 863-866. doi: 10.1130/g38042.1
- Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins. *American Mineralogist*, 90(10), 1473-1499. doi: 10.2138/am.2005.1871
- Kodavanti, U. P., Andrews, D., Schladweiler, M. C., Gavett, S. H., Dodd, D. E. et Cyphert, J. M. (2014). Early and delayed effects of naturally occurring asbestos on serum biomarkers of inflammation and metabolism. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 77(17), 1024-1039. doi: 10.1080/15287394.2014.899171
- Kusiak, R. A., Ritchie, A. C., Muller, J. et Springer, J. (1993). Mortality from lung cancer in Ontario uranium miners. *British Journal of Industrial Medicine*, 50(10), 920-928.
- Kusiak, R. A., Ritchie, A. C., Springer, J. et Muller, J. (1993). Mortality from stomach cancer in Ontario miners. *British Journal of Industrial Medicine*, 50(2), 117-126.

- Kusiak, R. A., Springer, J., Ritchie, A. C. et Muller, J. (1991). Carcinoma of the lung in Ontario gold miners: Possible aetiological factors. *British Journal of Industrial Medicine*, 48(12), 808-817.
- L'Heureux, M. (1992). *Caractérisation géochimique des volcanites et d'une cheminée d'altération dans la partie ouest du bloc de Powell, Rouyn-Noranda, Québec*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC).
- La Flèche, M. R. et Camiré, G. (1996). Geochemistry and provenance of metasedimentary rocks from the Archean Golden Pond sequence (Casa Berardi mining district, Abitibi subprovince). *Canadian Journal of Earth Sciences*, 33(5), 676-690. doi: 10.1139/e96-051
- Lambert, C. S., Alexander, B. H., Ramachandran, G., MacLehose, R. F., Nelson, H. H., Ryan, A. D. et Mandel, J. H. (2016). A case-control study of mesothelioma in Minnesota iron ore (taconite) miners. *Occupational & Environmental Medicine*, 73(2), 103-109. doi: 10.1136/oemed-2015-103105
- Lauzière, K. (1989). *Environnement géologique et minéralisation aurifère à la mine Bachelor, Desmaraisville, Québec*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC).
- Lavoie, J. S. (1972). *Geology of Opemiska mines: Internal report*. Toronto, ON: Falconbridge Copper.
- Lavoie, S. (2003). *Géologie de la mine East-Sullivan, Abitibi-Est, Val-d'or, Québec*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, QC).
- Lawley, C. J. M., Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Kjarsgaard, B., Knight, R. et Vaillancourt, D. (2015). Defining and mapping hydrothermal footprints at the BIF-hosted Meliadine gold district, Nunavut, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 155, 33-55. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.04.001
- Lee, Y. C., De Klerk, N. H. et Musk, A. W. (1999). Asbestos-related pleural disease in Western Australian gold-miners. *The Medical Journal of Australia*, 170(6), 263-265.
- Lemarchand, J. (2012). *Les minéralisations filoniennes aurifères du pluton de Bourlamaque (Val-d'Or, Abitibi) : synthèse structurale et apports de la datation 40AR/39AR*. (Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC).
- Lightfoot, N. E., Pacey, M. A. et Darling, S. (2010). Gold, nickel and copper mining and processing. *Chronic Diseases in Canada*, 29(Suppl 2), 101-124.
- Lippmann, M. (2014). Toxicological and epidemiological studies on effects of airborne fibers: Coherence and public health implications. *Critical Reviews in Toxicology*, 44(8), 643-695. doi: 10.3109/10408444.2014.928266
- Liu, Y., Rong, Y., Steenland, K., Christiani, D. C., Huang, X., Wu, T. et Chen, W. (2014). Long-term exposure to crystalline silica and risk of heart disease mortality. *Epidemiology*, 25(5), 689-696. doi: 10.1097/ede.0000000000000143
- Lowers, H. et Meeker, G. (2002). *Tabulation of asbestos-related terminology* (Rapport n° 02-458). Reston, VA: U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. Tiré de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr02458>
- Mandel, J. H., Ramachandran, G. et Alexander, B. H. (2016). Increased lung cancer mortality in Taconite mining: The potential for disease from elongate mineral particle exposure. *Chemical Research in Toxicology*, 29(2), 136-141. doi: 10.1021/acs.chemrestox.5b00472
- McLaughlin, J. K., Jing-Qinong, C., Dosemeci, M., Rong-An, C., Rexing, S. H., Zhien, W., ...Blot, W. J. (1992). A nested case-control study of lung cancer among silica exposed workers in China. *British Journal of Industrial Medicine*, 49(3), 167-171.
- McSwiggen, P. L. et Morey, G. B. (2008). Overview of the mineralogy of the Biwabik iron formation, Mesabi iron range, northern Minnesota. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S11-S25. doi: 10.1016/j.yrtph.2007.09.010
- Meeker, G. P., Bern, A. M., Brownfield, I. K., Lowers, H. A., Sutley, S. J., Hoefen, T. M. et Vance, J. S. (2003). The composition and morphology of amphiboles from the Rainy Creek Complex, near Libby, Montana. *American Mineralogist*, 88(11-12), 1955-1969.
- Mercier-Langevin, P. (2005). *Géologie du gisement de sulfures massifs volcanogènes aurifères Laronde, Abitibi, Québec*. (Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, QC).
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles. (2016). *Rapport sur les activités minières au Québec 2015* (Rapport n° DV 2016-01). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles.

- Minnesota Department of Health. (1997). *Cancer rates and trends in northeastern Minnesota* (Publication n° 97:1). Minneapolis, MN: Minnesota Department of Health. Tiré de http://www.health.state.mn.us/divs/hpcd/cdee/occhealth/documents/NE_Cancer97.pdf
- Mossman, B. T. (2008). Assessment of the pathogenic potential of asbestiform vs. nonasbestiform particulates (cleavage fragments) in in vitro (cell or organ culture) models and bioassays. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S200-S203.
- Mullenders, L., Atkinson, M., Paretzke, H., Sabatier, L. et Bouffler, S. (2009). Assessing cancer risks of low-dose radiation. *Nature Reviews Cancer*, 9(8), 596-604. doi: 10.1038/nrc2677
- Muller, J., Wheeler, W. C., Gentleman, J. F., Suranyi, G. et Kusiak, R. A. (1983). *Study of mortality of Ontario miners, 1955-1977, part 1*. Toronto, ON: Ontario Ministry of Labour, Ontario Workers' Compensation Board, Atomic Energy Control Board of Canada. Tiré de <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/19/072/19072300.pdf>
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2011). *Asbestos fibers and other elongate mineral particles: State of the science and roadmap for research*. Cincinnati, OH: NIOSH
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2017). *How NIOSH conducts risk assessments*. Cincinnati, OH: NIOSH. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/topics/riskassessment/how.html>
- Nelson, A. R., Liverman, C. T., Eide, E. A., Abt, E., Institute of Medicine et National Research Council. (2009). *A review of the NIOSH roadmap for research on asbestos fibers and other elongate mineral particles*. Washington, DC: National Academies Press.
- Nelson, G., Girdler-Brown, B., Ndlovu, N. et Murray, J. (2010). Three decades of silicosis: Disease trends at autopsy in South African gold miners. *Environmental Health Perspectives*, 118(3), 421-426. doi: 10.1289/ehp.0900918
- Nolan, R. P., Langer, A. M., Wilson, R. et Smith, J. V. (1999). A risk assessment for exposure to grunerite asbestos (amosite) in an iron ore mine. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), 3412-3419.
- Nymark, P., Wikman, H., Hienonen-Kempas, T. et Anttila, S. (2008). Molecular and genetic changes in asbestos-related lung cancer. *Cancer Letters*, 265(1), 1-15. doi: 10.1016/j.canlet.2008.02.043
- Odo, N. U., Mandel, J. H., Perlman, D. M., Alexander, B. H. et Scanlon, P. D. (2013). Estimates of restrictive ventilatory defect in the mining industry. Considerations for epidemiological investigations: A cross-sectional study. *BMJ Open*, 3(7). doi: 10.1136/bmjopen-2013-002561
- Organisation mondiale de la santé. (1998). *Détermination de la concentration des fibres en suspension dans l'air : méthode recommandée : microscopie optique en contraste de phase (comptage sur membrane filtrante)*. Genève, Suisse: OMS.
- Ostiguy, C., Morin, S., Bensimon, G. et Baril, M. (2012). *Résultats des analyses de substances chimiques produites à l'IRSST pour chaque région administrative du ministère de la Santé et des Services sociaux pour la période 2001-2008 (version révisée)* (Rapport n° R-731). Montréal, QC: IRSST.
- Parks, C. G., Conrad, K. et Cooper, G. S. (1999). Occupational exposure to crystalline silica and autoimmune disease. *Environmental Health Perspectives*, 107(Suppl 5), 793-802.
- Peters, S., Reid, A., Fritschi, L., Musk, A. W. et de Klerk, N. (2013). Cancer incidence and mortality among underground and surface goldminers in Western Australia. *British Journal of Cancer*, 108(9), 1879-1882. doi: 10.1038/bjc.2013.154
- Peters, S., Vermeulen, R., Fritschi, L., Musk, A. B., Reid, A. et de Klerk, N. (2017). Trends in exposure to respirable crystalline silica (1986-2014) in Australian mining. *American Journal of Industrial Medicine*, 60(8), 673-678. doi: 10.1002/ajim.22740
- Pham, Q. T., Caillier, I., Chau, N., Teculescu, D., Patris, A. et Trombert, B. (1993). La mortalité des mineurs de fer du bassin de Lorraine. *Archives des maladies professionnelles et de médecine du travail*, 54(5), 391-396.
- Pham, Q. T., Teculescu, D., Bruant, A., Chau, N., Viaggi, M. N. et Rebstock, E. (1992). Iron miners: A ten year follow-up. *European Journal of Epidemiology*, 8(4), 594-600.
- Pilote, P., Guha, J., Daigneault, R., Robert, F., Cloutier, J.-Y. et Golightly, J. P. (1990). The structural evolution of the Casa-Berardi East gold deposit, Casa-Berardi township, Quebec. Dans M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.-M. Lulin, G. Riverin et A. Simard (Édit.), *La ceinture polymétallique du Nord-Ouest québécois* (p. 337-348). Westmount, QC: Institut canadien des mines et de la métallurgie.

- Powell, W. G., Carmichael, D. M. et Hodgson, C. J. (1993). Thermobarometry in a subgreenschist to greenschist transition in metabasites of the Abitibi greenstone belt, Superior Province, Canada. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(1), 165-178.
- Powell, W. G., Carmichael, D. M. et Hodgson, C. J. (1995). Conditions and timing of metamorphism in the southern Abitibi greenstone belt, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(6), 787-805. doi: 10.1139/e95-067
- Pufahl, P. K., Anderson, S. L. et Hiatt, E. E. (2014). Dynamic sedimentation of Paleoproterozoic continental margin iron formation, Labrador Trough, Canada: Paleoenvironments and sequence stratigraphy. *Sedimentary Geology*, 309, 48-65. doi: 10.1016/j.sedgeo.2014.05.006
- Rafini, S. (2014). *Fiches descriptives de gîtes : faille de Cadillac*. Chicoutimi, QC: CONSOREM. Tiré de http://www.consorem.ca/production_scientifique/2012_01/2012-01_fiches%20de%20g%C3%AEtes.pdf
- Ravenelle, J.-F. (2013). *Amphibolite facies gold mineralization: An exemple from the Roberto deposit, Eleonore property, James Bay, Quebec*. (Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec, QC).
- Reid, P. J. et Sluis-Cremer, G. K. (1996). Mortality of white South African gold miners. *Occupational & Environmental Medicine*, 53(1), 11-16.
- Retty, J. A. (1944). *Région de la rivière Romaine inférieure, comté de Saguenay*. Québec, QC: ministère des Mines
- Rojas, M., Drake, P. L. et Roberts, S. M. (2001). Assessing mercury health effects in gold workers near El Callao, Venezuela. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 43(2), 158-165.
- Sanfaçon, R., Grant, M. et Trudel, P. (1987). *Géologie de la mine Canadian Malartic, district de Val-d'Or* (Publication n° MB87-26). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources
- Sauvé, P., Imreh, L. et Trudel, P. (1993). *Description des gîtes d'or de la région de Val-d'Or* (Publication n° MM 91-03). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources
- Sauvé, P. et Makila, A. (1987). *Géologie de la mine Camflo, région de Malartic* (Publication n° MB 87-40). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles
- Sauvé, P., Perrault, G. et Trudel, P. (1986). *Compilation et données nouvelles sur les gîtes d'or du camp minier de Val-d'Or* (Publication n° MB 86-24). Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources
- Secrétariat au Plan Nord. (2015). *Le Plan Nord à l'horizon 2035 : plan d'action 2015-2020*. Québec, QC: Gouvernement du Québec. Tiré de https://plannord.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2015/04/Synthese_PN_FR.pdf
- Sharma, K. N. M. et Franconi, A. (1975). *Région des rivières Magpie, Saint-Jean, Romaine (Grenville 1970) : rapport géologique* (Publication n° 163). Québec, QC: ministère des Richesses naturelles
- Sheehy, J. W. et McJilton, C. E. (1990). *Reconstruction of thirty years of free silica dust exposure in the taconite industry*. Communication présentée à VIIIth International Pneumoconioses Conference, Pittsburgh, PA (p. 1001-1006). Tiré de <http://www.cdc.gov/niosh/docs/90-108/>
- Sherlock, R., Pehrsson, S., Logan, A. V., Hrabí, R. B. et Davis, W. J. (2004). Geological setting of the Meadowbank gold deposits, Woodburn Lake Group, Nunavut. *Exploration and Mining Geology*, 13(1-4), 67-107. doi: 10.2113/gsemg.13.1-4.67
- Siegrist, H. G. et Wylie, A. G. (1980). Characterizing and discriminating the shape of asbestos particles. *Environmental Research*, 23(2), 348-361.
- Simard, M., Gaboury, D., Daigneault, R. et Mercier-Langevin, P. (2013). Multistage gold mineralization at the Lapa mine, Abitibi Subprovince: Insights into auriferous hydrothermal and metasomatic processes in the Cadillac-Larder Lake Fault Zone. *Miner Deposita*, 48(7), 883-905. doi: 10.1007/s00126-013-0466-3
- Simonato, L., Moulin, J. J., Javelaud, B., Ferro, G., Wild, P., Winkelmann, R. et Saracci, R. (1994). A retrospective mortality study of workers exposed to arsenic in a gold mine and refinery in France. *American Journal of Industrial Medicine*, 25(5), 625-633.
- Sodhi-Berry, N., Reid, A., Fritschi, L., Musk, A. B., Vermeulen, R., de Klerk, N. et Peters, S. (2017). Cancer incidence in the Western Australian mining industry (1996-2013). *Cancer Epidemiology*, 49, 8-18. doi: 10.1016/j.canep.2017.05.001
- Srebro, S. H. et Roggli, V. L. (1994). Asbestos-related disease associated with exposure to asbestiform tremolite. *American Journal of Industrial Medicine*, 26(6), 809-819.

- Steenland, K. (2005). One agent, many diseases: Exposure-response data and comparative risks of different outcomes following silica exposure. *American Journal of Industrial Medicine*, 48(1), 16-23. doi: 10.1002/ajim.20181
- Steenland, K. et Brown, D. (1995a). Mortality study of gold miners exposed to silica and nonasbestiform amphibole minerals: An update with 14 more years of follow-up. *American Journal of Industrial Medicine*, 27(2), 217-229.
- Steenland, K. et Brown, D. (1995b). Silicosis among gold miners: Exposure-response analyses and risk assessment. *American Journal of Public Health*, 85(10), 1372-1377.
- Steenland, K., Mannetje, A., Boffetta, P., Stayner, L., Attfield, M., Chen, J., ...Checkoway, H. (2001). Pooled exposure-response analyses and risk assessment for lung cancer in 10 cohorts of silica-exposed workers: An IARC multicentre study. *Cancer Causes Control*, 12(9), 773-784.
- Streib, W. C. (1978). Asbestos. Dans M. Grayson et D. Eckroth (Édit.), *Encyclopedia of chemical technology* (3^e éd.). New-York, NY: Wiley-Interscience.
- Tremblay, A. (2001). Postmineralization faults in the Beaufor gold deposit, Abitibi Greenstone Belt, Canada: Geometry, origin, and tectonic implications for the Val-d'Or mining district. *Economic Geology*, 96(3), 509-524. doi: 10.2113/gsecongeo.96.3.509
- Trudel, P. et Sauvé, P. (1992). *Synthèse des caractéristiques géologiques des gisements d'or du district de Malartic*. Québec, QC: ministère de l'Énergie et des Ressources.
- Tse, L. A., Li, Z. M., Wong, T. W., Fu, Z. M. et Yu, I. T. (2007). High prevalence of accelerated silicosis among gold miners in Jiangxi, China. *American Journal of Industrial Medicine*, 50(12), 876-880. doi: 10.1002/ajim.20510
- U.S. Geological Survey. (2016). *Mineral commodity summaries 2016*. Reston, VA: U.S. Geological Survey
- Van Gosen, B. S. (2010). The geology of natural asbestos deposits and its application to public health policy. *Geology in China*, 37(3), 704-710. Tiré de http://geochina.cgs.gov.cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20100324&flag=1&year_id=2010&quarter_id=3
- Weber, L. W. (2002). Georgius Agricola (1494-1555): Scholar, physician, scientist, entrepreneur, diplomat. *Toxicological Sciences*, 69(2), 292-294.
- Williams, C., Dell, L., Adams, R., Rose, T. et Van Orden, D. (2013). State-of-the-science assessment of non-asbestos amphibole exposure: Is there a cancer risk? *Environmental Geochemistry and Health*, 35(3), 357-377. doi: 10.1007/s10653-012-9500-0
- Wilson, R., McConnell, E. E., Ross, M., Axten, C. W. et Nolan, R. P. (2008). Risk assessment due to environmental exposures to fibrous particulates associated with taconite ore. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S232-S245.
- Wright-Holfeld, A., Mercier-Langevin, P. et Dubé, B. (2010). *Contrasting alteration mineral assemblage associated with the Westwood deposit ore zones Doyon-Bousquet-LaRonde mining camp, Abitibi, Québec*. (Publication n° 2010-09). Ottawa, ON: Natural Resources Canada
- Yergeau, E., Sanschagrín, S., Maynard, C., St-Arnaud, M. et Greer, C. W. (2014). Microbial expression profiles in the rhizosphere of willows depend on soil contamination. *The ISME Journal*, 8(2), 344-358. doi: 10.1038/ismej.2013.163
- Zanko, L. M., Niles, H. B. et Oreskovich, J. A. (2008). Mineralogical and microscopic evaluation of coarse taconite tailings from Minnesota taconite operations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 52(1), S51-S65.
- Zumwalde, R. D., Ludwig, H. R. et Dement, J. M. (1981). *Industrial hygiene report: Homestake Mining Company, Lead, South Dakota*. Cincinnati, OH: NIOSH.

ANNEXE A : GLOSSAIRE

A.I Épidémiologie

Incidence (taux)

Le taux d'incidence est une mesure de la fréquence à laquelle un événement survient dans une population et dans une période définies. Il s'agit du nombre de nouveaux cas diagnostiqués pendant une période donnée divisé par le nombre de personnes à risque de développer la maladie durant la période.

Rapport de cotes (RC)

Dans une étude cas-témoins, le rapport de cotes est le rapport de la proportion de sujets exposés chez les malades sur la proportion de sujets exposés chez les non-malades, ce qui donne une estimation du risque d'être atteint d'une maladie associée à une exposition donnée.

Rapport d'incidence standardisé (RIS) et rapport de mortalité standardisé (RMS)

Dans une étude de cohorte, le RIS et le RMS sont le rapport du nombre de cas, ou de décès, **observés** dans la population étudiée sur le nombre de cas, ou de décès, **attendus** selon les taux d'incidence ou de décès par maladie dans la population générale. L'adjectif « standardisé » vient du fait que le nombre d'« attendus » est calculé après une standardisation effectuée d'après la structure d'âge de la population étudiée.

Rapport de taux d'incidence

C'est le rapport entre le taux d'incidence standardisé selon l'âge, pour une maladie dans une région donnée **et** le taux d'incidence pour l'ensemble du pays.

Risque relatif (RR)

C'est le rapport du **risque** de maladie chez les sujets **exposés** sur le risque chez les **non-exposés**. Le **risque de maladie chez les exposés** est le rapport du nombre de personnes malades et exposées divisé par le nombre total de personnes exposées. Le **risque de maladie chez les non-exposés** est le nombre de personnes malades et non exposées divisé par le nombre total de personnes non exposées. C'est une probabilité conditionnelle.

Taux de mortalité annuel

Il s'agit du nombre de décès survenus durant une année dans une population donnée vivante au début de la période.

A.II Expologie et géologie

Angle d'extinction

Propriété physique de certains minéraux anisotropes, déterminée à l'aide d'un microscope pétrographique en lumière polarisée. C'est l'angle entre une position de référence connue alignée avec les fils du réticule N-S (ou E-O) et la position d'extinction (le minéral devient noir). La position de référence peut être un clivage, une macle, une face ou une zone. Seule l'extinction maximale est significative.

Biréfringence

Propriété physique des minéraux anisotropes, déterminée à l'aide d'un microscope pétrographique en lumière polarisée. C'est la mesure du retard encouru par un rayon lumineux qui emprunte un parcours suivant le grand indice de réfraction (N) du minéral et un autre rayon qui accomplit un parcours suivant le petit indice (n). Ce retard est exprimé par la couleur de biréfringence maximum (N-n) trouvée sur l'ensemble des sections du minéral.

Clivage

Plans de cassure, parallèles à une face du cristal, dus à des liaisons chimiques systématiquement plus faibles dans un plan que dans l'autre.

Craton

Vaste surface de croûte continentale stable située loin de toute activité tectonique. Par exemple, l'entité géographique bien connue nommée Bouclier canadien fait partie du craton supérieur formé il y a 2,8-2,6 milliards d'années.

Lithologie

Nature des roches d'une formation géologique (composition chimique ou minéralogique, taille et cohésion des particules qui les constituent, modes de mise en place) (Baize, 2004).

Pléochroïsme

Propriété physique de certains minéraux anisotropes de changer de couleur selon leur angle avec le polariseur déterminée à l'aide d'un microscope pétrographique en lumière polarisée.

Réfringence

Propriété physique de certains minéraux anisotropes, déterminée à l'aide d'un microscope pétrographique en lumière transmise. C'est une façon relative d'évaluer l'indice de réfraction du minéral en comparant l'accentuation de son contour à celui d'un minéral connu : faible (quartz), moyen (micas), fort (grenat).

Taconite

La taconite est un terme industriel pour décrire les formations de fer fraîches contenant au moins 25 % de fer. La taconite est une formation de fer métamorphisée. Elle est généralement à grains fins, dure et dense, et contient des quantités substantielles de quartz (20 – 50 %), magnétite (10 – 36 %) et divers minéraux incluant l'hématite, des carbonates, des amphiboles (surtout des séries cummingtonite-grunérite, quoique l'actinolite et la hornblende sont parfois présentes), la greenalite, la chamosite, la minnésotaite et stilpnomélane (Nolan *et al.*, 1999)

ANNEXE B : RÉSULTATS DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

B.I Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques menées auprès de travailleurs des mines d'or

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
États-Unis	(Steenland et Brown, 1995a) (Steenland et Brown, 1995a, 1995b)	<p>↑ Décès par cancer du poumon (n = 112, risque s.s. 1,21, comparé à la population du comté)</p> <p>↑ Décès par cancer hématopoïétique (n = 35, risque n.s. 1,29)</p> <p>↑ Décès par cancer du péritoine (n = 4, risque n.s. 2,81)</p> <p>↑ Décès par silicose/silico-tuberculose (risque s.s. 2,61-3,51)</p> <p>↑ Décès par pneumoconiose (n=92, risque s.s. =2,61)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Risque plus élevé après 30 ans de travail; pas de relation exposition-réponse avec durée d'exposition à la silice ou aux amphiboles non amiantiformes • Association exposition-réponse s.s. avec indice cumulatif de silice et d'empoussièrement • Association exposition-réponse s.s. avec indice cumulatif d'empoussièrement
Afrique du Sud	(Hnizdo <i>et al.</i> , 1997; Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991) (Reid et Sluis-Cremer, 1996)	<p>↑ Décès par cancer poumon (n = 143, risque s.s. 1,40)</p> <p>↑ Décès par pneumoconiose (n = 16, risque s.s. 21,33), BPCO (n = 176, risque s.s. 1,89), pneumonie (n = 68, risque s.s. 1,46), bronchite, (n = 36, risque s.s. 2,61)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec tabac, exposition cumulative à la silice et présence de silicose; pas de lien avec durée de travail minier (pas d'analyse avec PMA) • Relation exposition-réponse de la MPOC avec tabac et exposition cumulative aux poussières totales (5 ans avant le décès; analyse non présentée pour les autres maladies) • Relation exposition-réponse avec tabac et hypertension. Pas de lien avec empoussièrement ou durée du travail minier

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
Australie de l'Ouest	<p>(de Klerk, N. H. et Musk, 1998)</p> <p>(Peters <i>et al.</i>, 2013)</p> <p>(Lee <i>et al.</i>, 1999)</p> <p>(de Klerk, N. H. <i>et al.</i>, 2002; de Klerk, N. H. et Musk, 1998)</p> <p>(Sodhi-Berry <i>et al.</i>, 2017)</p> <p>(Lee <i>et al.</i>, 1999)</p>	<p>↑ Décès par cancer du poumon (n = 138, risque s.s. 1,49)</p> <p>↑ Cancer du poumon : augmentation s.s. de décès (n = 182, RMS = 1,64) et d'incidence (n = 110, RIS = 1,89)</p> <p>↑ Incidence du cancer de la prostate (n = 122, RIS = 1,32), mais ↓ n.s. de mortalité (n = 37, RMS = 0,94)</p> <p>• Mésothéliome : rapport de 1 cas chez un ancien mineur</p> <p>↑ Décès par pneumoconiose (n = 48, risque s.s. 11,2) Indemnisation pour silicose (631 cas/1040 demandes)</p> <p>↑ Cancer du poumon : augmentation s.s. d'incidence (n = 43, RR=1,77)</p> <p>↑ Cancer colorectal : augmentation s.s. d'incidence (n = 76, RR=1,70)</p> <p>• Mésothéliome : ↑ n.s. d'incidence (n=8, RR=1,90)</p> <p>• Plaques pleurales : rapport de 2 cas chez d'anciens mineurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec log d'exposition cumulative à la silice, après ajustement pour tabac et bronchite; tendance à l'augmentation du risque d'incidence avec durée de travail (pas d'analyse avec PMA) • Risques de décès plus élevés chez mineurs souterrains. Tendance à l'augmentation du risque d'incidence avec durée de travail souterrain (après ajustement pour durée du tabagisme) (pas d'analyse avec PMA) • Risques de décès plus élevés chez mineurs de surface. Pas de lien avec la durée de travail souterrain (pas d'analyse avec PMA) • Augmentation s.s. du risque d'indemnisation avec durée et intensité de travail dans mines de surface et souterraines • Pas d'indemnisation pour silicose des mineurs ayant commencé à travailler dans les mines depuis 1974, après abaissement des normes d'exposition à la silice • Pas de données détaillées d'exposition (seulement travail exclusivement dans mines d'or contre travail avec plusieurs types de minéraux)
France	(Simonato <i>et al.</i> , 1994)	<p>↑ Décès par cancer du poumon (n = 19, risque s.s. 2,17); exposition avant 1955 : n = 19, RMS = 2,69)</p> <p>↑ Décès par maladie de Hodgkin (n = 2, risque s.s. 11,76)</p> <p>• Pas d'↑ s.s. de maladies non cancéreuses</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse avec durée d'emploi et avec travail avant 1955. Lien avec durée de travail minier (pas d'analyse avec PMA)

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
République populaire de Chine	(Tse <i>et al.</i> , 2007)	<ul style="list-style-type: none"> • Forte prévalence de silicose accélérée (n = 167 cas, 29,1 % de 574 mineurs) 	<ul style="list-style-type: none"> • Après une moyenne de 5,6 ans d'exposition à des niveaux très élevés de poussières contenant jusqu'à 76,1 % de silice; augmentation de risque avec histoire de tuberculose • Pas de données sur les cancers
Canada (Ontario)	(Kusiak <i>et al.</i> , 1991) (Kusiak, Ritchie, Springer, <i>et al.</i> , 1993)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par cancer du poumon chez travailleurs embauchés avant 1946 (n = 236, risque s.s. 1,40) • 2 cas de mésothéliome (sur 13 603 mineurs) ↑ Décès par cancer de l'estomac (n = 104, risque s.s. 1,52; chez mineurs < 60 ans, n = 45, risque s.s. 1,67; chez mineurs immigrants, premiers 20 ans après embauche, n = 12, risque s.s. 2,7) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec arsenic pour travail avant 1946 et avec radon, sans limite d'année d'embauche; pas de mention de durée d'emploi • Pas de lien avec poussières contenant des fibres minérales • Risque plus élevé à un plus jeune âge et chez immigrants • Relation exposition-réponse s.s. pour durée de travail comme mineur et exposition cumulative au chrome, mais pas pour durée de travail dans les mines contenant des fibres. Pas de lien plausible avec exposition aux fumées d'échappement de moteurs diesels ou à la prise d'aluminium (poudre McIntyre)

↑, augmentation; ↓, diminution; BPCO, bronchopneumopathie chronique obstructive (anciennement maladies pulmonaires obstructives chroniques ou MPOC); mppcf, million de particules par pied cube d'air; n.s., non statistiquement significatif; s.s., statistiquement significatif

B.II Résumé des résultats statistiquement significatifs des études épidémiologiques menées auprès de travailleurs des mines de fer, incluant les mines de taconite

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
États-Unis	(Allen, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par mésothéliome (n = 30, risque s.s. 2,77) ↑ Décès par cancer du poumon (n = 949, risque s.s. 1,16) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'association avec durée d'emploi dans les mines
	(Allen, 2015; <i>Ann Epidemiol</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de mésothéliome (n = 51, risque s.s. 2,4) ↑ Incidence de cancer du poumon (n = 973, risque s.s. 1,3) ↑ Incidence de cancer du larynx (n = 94, risque s.s. 1,4) ↑ Incidence de cancer de l'estomac (n = 105, risque s.s. 1,4) 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution du risque après ajustement pour le tabagisme • Diminution du risque après ajustement pour le tabagisme • Diminution du risque après ajustement pour le tabagisme
	Allen, 2015; <i>Occup Environ Med</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'augmentation de risque de cancer du poumon (n=1706 cas, risque n.s. 0,99) 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de risque en lien avec PMA après ajustement pour exposition à l'amiante, sexe et travail en mine d'hématite
	(Allen, 2015; <i>Ann Epidemiol; Occup Environ Med</i>); (Lambert et al., 2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Incidence de mésothéliome (n = 80 cas, ↑ risque de 3 % par année d'emploi et de 10 % par PMA/ml-année supplémentaire) 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Mésothéliome</u> : Association exposition-réponse presque statistiquement significative avec durée d'emploi en mines de taconite et avec exposition cumulative aux PMA
	(Finnegan et Mandel, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Prévalence d'anomalies pleurales (n = 198/980, risque à la limite s.s. 1,02) • Selon durée d'emploi 30-34 ans : risque s.s. 1,65 • Selon durée d'emploi 35 ans + : risque s.s. 1,84 • Avec exposition cumulative 1,16 PMA/ml-année et + : risque s.s. 1,93 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque ajusté pour âge, sexe, indice de masse corporelle, années de travail dans l'hématite et emplois avec forte probabilité d'exposition à l'amiante

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
	(Odo <i>et al.</i> , 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats suivant la même tendance, mais moins clairs pour anomalies parenchymateuses (opacités) • Estimations de prévalence de problèmes restrictifs de 3,2 à 7,8 % et de problèmes obstructifs de 5,0 à 27,6 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Particularités des tests : variabilité non négligeable associée aux critères retenus pour acceptabilité des tests; effet de l'indice de masse corporelle
République populaire de Chine	<p>(Chen, S. Y. <i>et al.</i>, 1990)</p> <p>(McLaughlin <i>et al.</i>, 1992) (Chen, J. <i>et al.</i>, 1992) (Chen, W. <i>et al.</i>, 2007)</p> <p>(Chen, S. Y. <i>et al.</i>, 1989)</p> <p>(Chen, J. <i>et al.</i>, 1992)</p>	<p><i>Mines d'hématite</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ↑ décès par cancer du poumon (n = 29, risque s.s. 3,7); risque plus élevé avant introduction de ventilation et perçage humide (RMS 4,8); pas d'excès chez non-fumeurs • Pas d'augmentation de décès par cancers de l'estomac, du foie et de l'œsophage <p><i>Mines de fer/cuivre</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pas d'augmentation de décès par cancer du poumon ↑ de silicose parmi les mineurs avec cancer du poumon (n = 15, risque s.s. 3,1) ↑ décès par cancer du foie <p><i>Mines d'hématite</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ↑ décès par maladie respiratoire non maligne (n = 278), particulièrement avec forte exposition aux poussières (risque s.s. 5,3) et pour une embauche avant l'amélioration de la ventilation et le forage à eau (risque s.s. 6,0) <p><i>Mines de fer/cuivre</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ↑ décès par pneumoconiose (risque s.s. 15,94) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse avec niveau d'empoussièremment; risque plus élevé pour travailleurs embauchés avant utilisation de procédés humides et en présence de maladies pulmonaires chroniques (pas d'analyse avec poussières, silice ou radon et pas de mention de PMA) • Pas de lien exposition-réponse avec exposition cumulative à la poussière totale, à la silice, à l'arsenic, aux HAP ou au radon (pas de mention de fibres ou PMA) • Risque de décès plus élevé chez silicotiques (pas de mention de fibres ou PMA) • Pas d'analyse exposition-réponse et pas de mention de PMA

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
Suède	(Björ, B. <i>et al.</i> , 2009)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par cancer pour mineurs souterrains (n = 720, risque s.s. 1,09) ↑ Décès par cancer du poumon pour l'ensemble des mineurs (n = non précisé, risque s.s. 1,73) 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque plus élevé pour travail souterrain de 15 ans et plus (SMR 1,16) (pas de mention de fibres ou PMA)
	(Björ, O. <i>et al.</i> , 2013)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de cancer du poumon (tous les mineurs, n = 270, risque s.s. 1,55; mineurs souterrains, n = 221, risque s.s. 1,74) ↑ Incidence de cancer de l'estomac chez mineurs souterrains (n = 117, risque s.s. 1,25) ↑ Incidence de cancer de la peau non mélanique (tous les mineurs, n = 80, risque s.s. 1,43; mineurs souterrains, n = 57, risque s.s. 1,39) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec durée de travail souterrain (RR 2,08 après 15 ans de travail souterrain) (pas de mention de fibres ou PMA) • Pas de relation exposition réponse pour les autres sites de cancer
	(Jonsson <i>et al.</i> , 2010)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de cancer des lèvres (tous les mineurs, n = 24, risque s.s. 1,62; mineurs souterrains, n = 18, risque limite s.s. 1,69) 	
	(Bergdahl <i>et al.</i> , 2010)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de cancer du poumon : excès de risque s.s. de 4,6 % par kBq/m³-année, lié au radon (n = 122; risque s.s. 2,80 à 3,33 après 40-65 kBq/m³-année et 4,27 à 5,10 après 95 kBq/m³-année et +) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec exposition cumulative au radon
	(Björ <i>et al.</i> , 2013)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de cancer du poumon dans la mine de Kiruna (n = 122, risque s.s. 1,48) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse s.s. avec exposition cumulative au quartz dans les 2 mines, et au radon et aux émissions de moteurs diesels dans la mine avec des niveaux plus élevés de ces deux dernières expositions (Malmberget)
	(Hedlund <i>et al.</i> , 2008)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par bronchopneumopathie chronique obstructive – BPCO (n = 90, risque s.s. 1,25) 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de confusion associé à la multiexposition (quartz, radon, diesel) dans la mine de Malmberget
	(Björ, B. <i>et al.</i> , 2009) (Adelroth, 2006)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par silicose (n = 58, risque s.s. 1,48) 	<ul style="list-style-type: none"> • Relation exposition-réponse avec la silice cristalline; augmentation brusque à partir d'une dose cumulative de 3,0 mg/m³-année

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
	(Hedlund <i>et al.</i> , 2004); (Hedlund <i>et al.</i> , 2006)	<p>↑ Décès par maladies respiratoires non cancéreuses (mineurs souterrains : n = 185, risque limite s.s. 1,17)</p> <p>↑ Incidence persistante d'inflammation des voies respiratoires après un repos de 4 semaines, similaire à l'inflammation après 3 mois de travail souterrain (n = 22 et 21 témoins)</p> <p>↑ Incidence de symptômes respiratoires (sifflements : n = 31 mineurs, risque s.s. 2,4; toux persistante : n = 17 mineurs, risque s.s. 1,8; bronchite chronique diagnostiquée par médecin : n = 10 mineurs, risque limite s.s. 2,2)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tendance à une augmentation non significative avec durée de travail souterrain • Pas d'analyse en lien avec les niveaux d'exposition (mention d'exposition aux poussières de minerai et au carbone élémentaire). Signes d'inflammation : macrophages, neutrophiles, fibronectine, métalloprotéinase matricielle 9 (pas de mention de fibres ou PMA) • Risques plus élevés chez les non-fumeurs selon l'enquête postale
France	(Pham, Q.T. <i>et al.</i> , 1993) (Pham, Q. T. <i>et al.</i> , 1992) (Chau <i>et al.</i> , 1993)	<p>↑ Décès par cancer du poumon chez travailleurs vivants en janvier 1982 et suivis 5 ans (n = 238, risque s.s. 2,44)</p> <p>↑ Décès par cancer de l'estomac (n = 48, risque s.s. 2,48): augmentation s.s. de 148 % décès – pas de dose-réponse</p> <p>↑ Décès par cancer des voies aérodigestives supérieures (n = 55, risque s.s. 1,29)</p> <p>↑ Décès par cancer de la vessie et de la prostate (n = 41, risque s.s. 1,34)</p> <p>↑ Décès par cancer du poumon chez travailleurs vivants en janvier 1975 et suivis 10 ans (n = 32, risque s.s. 3,89)</p> <p>↑ Décès par cancer de l'estomac (n = 4, risque s.s. 2,73)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Risque plus élevé chez mineurs avec travail souterrain de 30 ans et plus • Risque influencé par effet majeur plausible du tabagisme sur risques de cancers des voies aérodigestives supérieures et des cancers de la vessie et de la prostate (pas de mention de fibres ou PMA) • Risque plus élevé chez mineurs avec travail souterrain de 20 ans et plus et interaction entre durée de travail et tabagisme (pas de mention de fibres ou PMA) • Auteurs associent l'introduction des équipements au diesel avec l'augmentation du cancer du poumon, spécialement chez les travailleurs < 50 ans par comparaison des taux de mortalité par âge entre 1960-1976 et 1975-1985 (pas de mention de fibres ou PMA) • Pas de relation exposition-réponse, risque élevé même avant 20 ans d'exposition. 95,2 % de fumeurs

Pays	Réf.	Risque	Lien avec l'exposition
	(Pham, Q.T. <i>et al.</i> , 1993) (Pham, Q. T. <i>et al.</i> , 1992)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Décès par bronchite chronique et maladies pulmonaires obstructives (n = 166, RMS = 4,61) ↑ Décès par cirrhose et maladies hépatiques (n = 85, RMS = 1,49) • Fréquence de bronchite et de diminution des fonctions respiratoires liées à l'âge et au tabagisme 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de relation avec le travail selon les auteurs
Slovaquie	(Icso <i>et al.</i> , 1994)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Incidence de cancer du poumon, dans 2 régions minières – Étude cas-témoins (n₁ = 76 cas chez mineurs, risque₁ s.s. 2,81; n₂ = 76 cas chez mineurs, risque₂ s.s. 4,01) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de correction pour le tabagisme. Exposition au radon plus élevée chez les cas de la mine 1 et exposition aux fumées de moteurs diesels seulement dans la mine 2 • Pas de mention de fibres ou PMA

↑, augmentation; BPCO, bronchopneumopathie chronique obstructive (anciennement maladies pulmonaire obstructive chronique ou MPOC); kBq/m³, kilo-Becquerel par mètre cube d'air (unité de mesure de radioactivité correspondant à 1000 désintégrations par seconde par mètre cube d'air); PMA, particule minérale allongée; RMS, rapport de mortalité standardisé; s.s., statistiquement significatif

ANNEXE C : RÉSUMÉS DES DONNÉES D'EXPOLOGIE/MÉTROLOGIE

C.I Résultats d'expologie/méthrologie pour les mines d'or

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Homestake Mine souterraine Lead, South Dakota USA</p> <p>(NIOSH, 2011; Gamble, 2008; Steenland, 1995a; Steenland, 1995b; Lightfoot, 2010; Steenland, 2001)</p>	<p>Schistes métamorphisés de sidérite/quartz et de cummingtonite/quartz. Grandes masses et nombreux filons de quartz ainsi que : chlorite, amphiboles, sidérite et des quantités moindres de : sulfures (pyrrhotite, pyrite, arsénopyrite, galène, sphalérite et chalcopryrite), calcite, ankérite, biotite, grenat, fluorite, oxydes de fer et gypse.</p>	<p>Silice cristalline (teneur en quartz dans la poussière déposée : 39 %). Radon (< 0,01 WL) et arsenic (< 0,01 %) (Gillam <i>et al.</i>, 1976)</p> <p>PMA non amiantiformes > 5 µm : cummingtonite-grunérite (69 %) (d = 0,43 µm), trémolite-actinolite (15 %) (d = 0,27 µm) et autres amphiboles non amiantiformes (16 %) (Zumwalde <i>et al.</i>, 1981)(Brown <i>et al.</i>, 1986)</p> <p>PMA < 5 µm (MET) : 70 %–80 %; Toutes les PMA : (moyennes géométriques) : longueur = 3,2 µm; diamètre = 0,4 µm.</p> <p>-----</p> <p>Fibres aéroportées (MET - EDS et SAED) : fragments de clivage de type amphibole, mais pas de l'amiante (NIOSH, 2011) : 80 – 90 % des fibres dans l'air = amphiboles, non amiantiformes dont 60 – 70 % grunérite fibreuse (amosite), 1 – 2 % cummingtonite fibreuse et 10 – 15 % hornblende fibreuse. Faible concentration d'arsénopyrite. (Gillam <i>et al.</i>, 1976 ; Dement, 1976)</p>	<p>Fibres MOCP : 0,25 f/cm³ > 5 µm, max 2,8 f/cm³ (n = 200 échantillons personnels) MET : fibres totales : 4,82 ± 0,68 f/cm³ (0,66 - 11,79 f/cm³), médianes : diamètre = 0,13 µm; longueur = 1,1 µm (n = 22/200 échantillons les plus concentrés en MOCP). Fibres > 5 µm : 0,36 ± 0,08 f/cm³ (0,07 - 1,29 f/cm³); ≈ 94 % des fibres < 5 µm (Gillam <i>et al.</i>, 1976) Diamètre moyen géométrique : 0,43 µm (CG) et 0,27 µm (AT) ; longueur > 5 µm : 34 % (CG) et 32 % (AT) ; moyenne = 4,6 µm; max = 17,5 µm (Brown <i>et al.</i>, 1986)</p> <p>-----</p> <p>(mi-1970) : fibres > 5 µm : moyenne géométrique = 0,44 f/cm³ Radon en moyenne cumulative d'exposition : 0-18 WLM année. Arsenic : < 5 µg/m³. (Zumwalde <i>et al.</i>, 1981)</p> <p>-----</p> <p>Poussière aéroportée respirable : 13,1 % quartz (1 - 48 %) <u>Exposition cumulative</u> des travailleurs : Respirable (mg/m³-année [durée d'exposition moyenne en années]) : 0-0,2 (2,9 a); 0,2-0,5 (9,7 a); 0,5-1,0 (15,4); 1,0-2,0 (13,2); 2,0-3,0 (18,8); 3,0-4,0 (25,5); > 4,0 (30,6) Concentration médiane de silice : 0,05 mg/m³ (0,15 mg/m³ pour les travailleurs engagés avant 1930) (Dement, 1976)</p>

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
East/Central/West Rand Witwatersrand Reefs, Afrique du Sud (Lightfoot, 2010 Steenland, 2001 Hnizdo, 1990 Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991, 1993 Hnizdo <i>et al.</i> , 1997 Churchyard <i>et al.</i> , 2004)	La roche contient du quartz (70-90 %), des silicates (10-30 %), de la pyrite (1-4 %) et des métaux lourds (2-4 %) incluant des grains d'or et des minéraux contenant de l' uranium .	Poussières respirables : ≈ 30 % silice cristalline (Hnizdo et Sluis-Cremer, 1991; Hnizdo <i>et al.</i> , 1997) Roche mère : ≈ 60 % silice cristalline	Poussières respirables (mg/m ³) : $0,35 \pm 0,46$ (n=506); médiane : 0,17; étendue : 0,05 à 3,71 Silice respirable (mg/m ³) : $0,048 \pm 0,072$ (n=497); médiane : 0,019; étendue : 0 à 0,71 % quartz : $12 \pm 5,6$; médiane : 13,2; étendue : 0 - 21,3 Radon : WL moyen = 0,4 (0,1 - 3 pour différentes mines); > 100 WLM si travail > 20 ans (Churchyard <i>et al.</i> , 2004)
Kalgoorlie Australie-Occidentale (Steenland <i>et al.</i> , 2001 de Klerk et Musk, 1998 de Klerk, 2002 Peters <i>et al.</i> , 2013 Lee <i>et al.</i> , 1999)		Radon, arsenic et silice. Exposition à la poussière et à la silice estimée par un groupe d'experts. Fibres d'amiante selon le témoignage d'un hygiéniste industriel en audience gouvernementale (Lee, 1999)	Silice cristalline respirable : médiane : 0,43 mg/m ³ Radon : négligeable
Salsigne Aude, France (Simonato, 1994)	Aucune description géologique ou minéralogique	Arsenic (soluble et insoluble), radon, silice cristalline teneur en silice cristalline dans la poussière : $9,58 \pm 2,81$ %	Mi-1980 : amiante : 0,01 - 0,2 f/ml; Radon : 1000 - 2500 Bq/m ³ abaissé à 300 Bq/m ³ entre mi-1960 et mi-1980; 1966 - 1984 : poussières totales diminuent 611 à 527 particules/ml 1983-1987 : niveau d' arsenic : 183 - 505 $\mu\text{g As/g}$ de créatinine
Comté de Xiushui Province de Jiangxi Chine (Tse, 2007)		75,7 à 76,1 % des poussières totales étaient de la silice	Poussières totales dans la mine d'or souterraine: 102,6 à 159 mg/m ³ , avec une moyenne de 130,8 mg/m ³ . Estimation de silice respirable : 89,5 mg/m ³ (70,2 à 108,8 mg/m ³)

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Ontario (43 mines exploitées à partir de 1910) Canada</p> <p>(Lightfoot, 2010 Kusiak, 1991 Kusiak, 1993)</p>	<p>Gisements d'or en filon (<i>lode gold ores</i>): les fractures de la roche contiennent du quartz et des grains d'or natif. Des minéraux caractéristiques d'altération sont présents dont certains sont fibreux ou lamellés. L'or est surtout concentré dans les minéraux contenant de l'arsenic (telle l'arsénopyrite), particulièrement abondants dans les mines du <i>Ontario gold camps</i>.</p>	<p>Arsenic : dans la roche encaissante (0,1 %) ; concentration moyenne élevée dans les roches de 17 mines (0,02 - 1,6 %) et dans les rejets ou débris de 29 mines (0,01 - 1,3 %); arsénopyrite dans 13 mines; Silice cristalline : moyenne dans 7 mines (4,3 - 11,8 %); Radon Fibres : présence de trémolite dans 7 mines, d'actinolite dans 2 mines, d'actinolite/trémolite dans 1 mine et d'amphiboles fibreuses dans 1 mine; Indicateur d'exposition potentielle aux fibres : présence de komatiite (roche susceptible de se modifier en amphiboles ou serpentines) Chrome (fuchsite et chromite) : 20 – 2154 ppm dans la roche de 4 mines; 19 – 585 ppm dans les débris des 43 mines</p>	<p>Radon depuis les années 80 : moyenne de: 0,001 - 0,335 WL (section inactive) pour 16 mines 0,006-0,192 WL (section <i>exhaust</i>) pour 13 mines 0,003 - 0,174 WL (section active) pour 18 mines</p> <p>Poussières : < 1950 : 1000 particules/ml; > 1959 : 400 particules/ml; 1967 : < 200 particules/ml</p>

CG : cummingtonite-grunérite; AT : actinolite-trémolite;

MET : microscopie électronique à transmission; SAED : *Selected area electron diffraction* (diffraction des électrons en aire sélectionnée);

EDS : *Energy dispersive X-ray spectrometry* (analyse dispersive en énergie);

WL *working level*; WLM *working level months*.

C.II Résultats des données d'expologie/métriologie pour les mines de fer incluant les mines de taconite

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Mesabi Iron Range Minnesota USA</p> <p>7 mines en opération en 1983 : US Steel Corporation Hanna Mining Co. Reserve Mining Co. Pickands-Mather and Co. Eveleth Taconite Co. Inland Steel Co. Jones and Laughlin Corp.</p> <p>(Allen <i>et al.</i>, 2014)</p>	<p>Description géologique : Mesabi Iron Range : largeur 2,5 milles; longueur 122 milles. 4 zones minéralogiques, constituées de dépôt de taconite avec quartz, silicates de fer et PMA de natures variables.</p>	<p>Le minerai dans la zone la plus à l'est (zone 4) contient des PMA d'amphiboles riches en fer (principalement cummingtonite/grunérite), fibreuses à moins de 1 %.</p> <p>La zone la plus à l'ouest (zone 1) contient exclusivement des PMA non amiantiformes (quartz, hématite, sidérite, chamosite et greenalite).</p> <p>La zone 2 est transitionnelle avec quelques amphiboles.</p> <p>La zone 3, de minéralogie autre, n'a pas été exploitée.</p> <p>La principale exposition dans les opérations de taconite proviendrait des fragments de clivage non amiantiformes. Due à la différence minéralogique dans la zone de l'est par rapport aux zones de l'ouest, les travailleurs des deux zones ne sont pas nécessairement exposés au même type de particules minérales.</p>	

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Northshore Taconite Ore - Processing Facility (minerai provient de la mine Peter Mitchell)</p> <p>(Axten et Foster, 2008)</p>			<p>Majorité des particules comptées : fragments de clivage, environ 10 % > 5 µm et 1 % amiantiforme (hornblende, cummingtonite-grunérite et trémolite-actinolite).</p> <p>1974-75, niveaux moyens de particules fibreuses aéroportées (région de Silver Bay) : 0,0003 à 0,03 f/ml. Données recueillies plus tard : concentrations moy. 0,0626 f/cc (95 % CI 0,035–0,9 f/cc). Données de 1990-2001 : concentrations moy. particules fibreuses de type amphibole de 0,0022 f/ml (0,0001 à 0,0140 f/ml).</p> <p>↓ concentration moy. grunérite fibreuse : de 0,048 f/cc (1990) à 0,0088 f/cc (1998). Même tendance pour trémolite-actinolite fibreux : de 0,0186 f/cc (1990) à 0,0029 f/cc (1998).</p> <p>Concentrations : grunérite > trémolite-actinolite.</p>
<p>Mines de taconite</p> <p>(Gamble et Gibbs, 2008)</p> <p>Zone <i>Est</i> du Misabi Range (mine Reserve)</p> <p>Zone est, mais plus à l'ouest de la mine Reserve : mines Erie et Minntac</p>	<p>20-50 % quartz, 10-36 % magnétite et faibles quantités d'hématite, de carbonates, de greenalite, de chamosite, de minnésotaite, stilpnomélane et amphiboles non amiantiformes: cummingtonite-grunérite, actinolite et hornblende (Nolan <i>et al</i>, 1999).</p>	<p>Particules non amiantiformes (probablement grunérite) et actinolite (majoritairement avec AR > 3 et longueur < 10 µm, principalement en fragments de clivage (FC) aciculaires).</p> <p>Quantité d'amphiboles: Minntac < Erie < Reserve</p>	<p>Diamètre des amphiboles n-amiantiformes de la taconite (Grunérite + actinolite) > 0,25 µm;</p> <p>Fragments de clivage de grunérite aéroportés: longueur moyenne 5,5 µm et largeur moyenne 1,2 µm.</p> <p>< 0,5 f/ml</p> <p>Échantillons ambiants : concentrations stables entre 1952 et 1976</p> <p>< 2 f/ml</p> <p>(> 5 µm incluant les fragments de clivage allongés)</p>

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>6 mines</p> <p>(Hwang <i>et al.</i>, 2013)</p> <p>et références incluses :</p> <p>(Wilson <i>et al.</i>, 2008; Zanko <i>et al.</i>, 2008 McSiggen et Morey, 2008; Zanko <i>et al.</i>, 2008)</p> <p>(Hwang <i>et al.</i>, 2014)</p>	<p>La minéralogie change de l'est vers l'ouest :</p> <p>Zone est (1 mine) : présence d'amphiboles majoritairement non amiantiformes : cummingtonite-grunérite et un peu d'actinolite (ferroactinolite);</p> <p>Zone ouest (5 mines) : phyllosilicates (minnésotaite, greenalite, stilpnomélane en prépondérance). Donc PMA amphiboles (cummingtonite-grunérite et actinolite) ainsi que PMA non-amphiboles.</p>		<p>Concentration moyenne arithmétique (particules/cm³) :</p> <p>PMA totales : Est : 0,009-0,341 (valeur maximum = 2,2); Ouest : 0,014-0,095</p> <p>PMA d'amphiboles : Est : < LOD - 0,110; Ouest : < LOD (LOD = < 0,0001)</p> <p>Donc concentration de PMA d'amphiboles << 0,1 f/cc;</p> <p>PMA d'amphiboles < PMA totales; PMA d'amphiboles ne représentent pas une composante majeure des PMA de taconite.</p> <p>Exposition pour <i>Operating technician</i> (particules/cm³) :</p> <p><u>Est</u> : PMA totales : *1) 4,8; 2) 2,2; 3) 0,3; 4) 0,2;</p> <p>PMA d'amphiboles : 1) 2,7; 2) 1,2; 3) 0,2; 4) 0,1</p> <p><u>Ouest</u> : pas d'analyse possible</p> <p>*1) Fragments de clivage = AR ≤ 20 (MET);</p> <p>2) Suzuki = d ≤ 0,25; l ≤ 5 (MOCP, MET);</p> <p>3) NIOSH = l > 5; AR ≥ 3 (MOCP, MET);</p> <p>4) Chatfield = 0,04 < d < 1,5; 20 < AR < 1000 (MET).</p> <p>Concentrations plus élevées pour PMA totales et d'amphiboles : (1) fragments de clivage suivis par (2) fibres courtes (ou Suzuki).</p> <p>La fraction la plus élevée de PMA totales se trouve dans la catégorie de taille l = 1-3 µm et d = 0,2-0,5 µm, soit des fibres courtes.</p> <p>Pas d'amphiboles dans la zone ouest.</p>

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Mesabi Iron Range (McSwiggen et Morey, 2008)</p> <p>Eastern Mesabi Range (Langer, 2008)</p>	<p><u>Zone 1</u> (Ouest) : quartz, magnétite, hématite, carbonates, talc, chamosite, greenalite, minnésotaite et stilpnomélane; <u>Zone 2</u> : (<i>Biwabik Iron Formation</i>) change peu; <u>Zone 3</u> minéralogie change drastiquement : grunérite dans la forme tabulaire et fibreuse; <u>Zone 4</u> (Est) : silicates complètement métamorphosés : grunérite, hornblende, hédénbergite, ferrohypersthène et fayalite. Magnétite et quartz + grunérite (cumingtonite), actinolite, hornblende, riébeckite + Na-hornblende. Textures d'intercroissance d'amphiboles sont communes (actinolite et hornblende).</p>		
<p>Taconite (Iron ore mines, Northeastern Minnesota) (NIOSH Current Intelligence Bulletin 62, 2011)</p>		<p>Pas de fibre d'amiante d'aucune sorte dans les mines (selon la définition réglementaire). Cependant : ferroactinolite fibreuse, sépiolite ferrique fibreuse, grunérite et actinolite fibreuse ($d < 0,01 \mu\text{m}$ et AR très élevé). Amphiboles fibreuses et sépiolite ferrique représentent une faible fraction de 1 % de la masse totale de la roche (Ross <i>et al</i>, 2007).</p>	

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Mine Peter Mitchell (près de Babbitt, Minnesota)</p> <p>(Wilson <i>et al.</i>, 2008)</p>		<p>53 échantillons recueillis dans 30 sites : - 8 échantillons/7 sites : quantité significative d'amphiboles ferroactinolites fibreuses;</p> <p>- 2 échantillons/2 sites : ferroactinolite dégradée en masse fibreuse consistant surtout en sépiolite ferrique (DRX. MET et MEB);</p> <p>- Échantillons de 5 autres sites : amphiboles non altérées et une très petite quantité de faisceaux de fibres composés d'un mélange de grunérite, ferroactinolite et sépiolite ferrique.</p>	<p>Échantillonnage sur une période de 5 jours dans les zones où des matériaux fibreux peuvent être présents;</p> <p>Amphiboles (cummingtonite, grunérite, actinolite, hornblende);</p> <p>concentration moyenne dans l'air de Silver Bay : < à 0,00036 f/ml;</p> <p>** méthodologie d'échantillonnage et d'analyse non décrite**</p>
<p>Mine de fer non identifiée (veine de grunérite)</p> <p>(Nolan <i>et al.</i>, 1999)</p>	<p>Veine de grunérite amiante (amosite) : fibres et non des FC, localisée dans une zone relativement petite de la mine. Pas d'autres fibres d'amiante. Amiante grunérite confiné aux veines de quartz-ankérite-grunérite de la roche hôte. Les veines font jusqu'à 3 pieds d'épaisseur.</p>		

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Northshore's operation Peter Mitchell Pit, Eastern part of Minnesota's Mesabi Iron Range. Silver Bay, Minnesota (Wilson <i>et al.</i>, 2008)</p>	<p>Étude géologique de la source de minéraux de Silver Bay venant de la mine Peter Mitchell : pas d'amiante détecté, mais 2 types de minéraux fibreux non-amiantifère dans des zones très limitées : ferroactinolite et sépiolite très fibreuse</p>	<p>49 échantillons de vrac recueillis à la mine Peter Mitchell dans des zones les plus susceptibles de contenir de l'amiante (failles, etc.). Le minerai de taconite contient du quartz et approximativement 30 % d'amphiboles : hornblende, cummingtonite-grunérite et trémolite-actinolite. Seulement une fraction de moins de 1 % de la masse totale de la roche est fibreuse. Pas de minéraux amiantifères.</p>	<p>Échantillons d'air autour de Silver Bay pour type, concentration et tailles des fibres aéroportées : 80 % des fibres = composition de cummingtonite-grunérite, 20 % = composition de la trémolite-actinolite; <u>Concentration moyenne</u> des 2 types de fibres : 0,00014 f/ml; <u>Distributions de tailles</u>: < 5 µm : 66 % (dmoyen 0,6 µm; ARmoyen 6,2); 5-10 µm : 23,5 % (dmoyen 1,13 µm; ARmoyen 9,1); 10-20 µm : 9,6 % (dmoyen 2,12 µm; ARmoyen 8,4); > 20µm : 1 % (dmoyen 3,65 µm; ARmoyen 10)</p>

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>5 mines Western Mesabi Range taconite (iron ore) operations: EVTAC, Hibbing Taconite (Hibtac), USX Minntac, Ispat Inland (Minorca), et National Steel Pellet Company (NSPC)</p> <p>(Zanko <i>et al.</i>, 2008)</p>		<p>DRX : quartz (55–60 %), hématite et faibles quantités d'oxydes de fer, de carbonates et de silicates. Pas d'amphiboles.</p> <p>MLP (<i>point-counting</i>): traces de fragments de clivage (FC) non-amphiboles dans les échantillons des mines Ispat Inland (Minorca) et Minntac. 4 FC trouvés avec un L/D >3 modéré et sans évidence de structure en fibrilles. Pas d'amiante réglementé détecté.</p> <p>MEB: Aucun minerai d'amiante ou d'amphibole observé dans le Western Mesabi: 26 particules L/D > 3 et d > 0,25 µm: FC minérales/ fibres non amiantifères et non amphiboles (principalement minnésotaite et talc, minéraux silicatés communs à la Formation de Fer de Biwabik).</p> <p>MET : Pas de minéraux d'amiante ou de FC d'amphiboles; <i>MET Superfound</i> : Pas de fibres d'amiante ou de FC > 5 µm et plus mince que 0,5 µm</p>	<p>Données pour l'est confirmant la présence de fragments de clivage (L > 5 µm et L/D > 3) - cummingtonite, actinolite et hornblende. Amphiboles absentes dans les cinq mines de l'ouest du Mesabi Range, mais présentes dans l'est : MLP : ~ 10–15 % FC amphiboles (trémolite/actinolite) avec L/D > 3, pas indication de fibrilles. SEM : 51 particules avec L/D > 5 et D = 0,25 et 2 µm MET : pas d'amiante, mais trémolite-actinolite FC (0,02 % concentration en poids). RJ Lee Group : conclusion que FC d'amphiboles, mais non d'amiante détectés dans échantillon recueilli sur le site de Cliffs Northshore.</p>

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Longyan (province Hebei) et Taochong (province Anhui), Chine. (Chen, 1989; (Cao <i>et al.</i>, 2016)</p>	<p><i>Taochong</i> : deux types de minerai. Type 1 : hématite, magnétite, quartz, calcite. Type 2 : hématite, grenat, pyroxène, actinolite, chlorite, quartz, calcite</p>	<p>Hématite Poussière déposée : Fe, 28 % (Longyan) et 23 % (Taochong), Ti, 0,1 % (Longyan) et 0,04 % (Taochong), arsenic, chrome, nickel, cobalt, cadmium et béryllium... <0,01 % par spectrographie à plasma</p>	<p>Poussière²⁴ : 3,8 mg/m³ (n = 4655; 1,8-9,2 mg/m³) mineurs et foreurs; 2,7 mg/m³ (n = 167; 1,2-3,0 mg/m³) opérateurs de chargeuse automatique. BaP : 0,03 µg/m³ (n = 7; 0,007-0,16 µg/m³). Radon : (1028 Bq/m³ et 317 x 10⁻⁸ J/m⁻³; n = 38) à Longyan. Extérieur : (19 Bq/m³, 3 x 10⁻⁸ J/m³; n = 3) Concentrations moyennes en poussières totales²⁵ : Longyan, Concentrations moyennes de BaP, 0,08 µg/m³ (n = 6; 0,015-0,36 µg/m³) (Taochong) et 0,03 µg/m³ (n = 7; 0,007-0,16 µg/m³) (Longyan). Parmi les travailleurs moyennement et fortement exposés, 0,04 (n = 4) et 0,07 µg/m³ (n = 6). Radon : WLM sous-terre, Longyan : 1,3 ± 0,7 et Taochong : 1,8±1,7</p>

²⁴ La méthode d'échantillonnage n'est pas décrite

²⁵ Pas de détail sur la méthode d'échantillonnage

Mine (Réf.)	Données minéralogiques	Exposition potentielle	Données d'exposition
<p>Malmberget, Suède (Johnson <i>et al.</i>, 2010 Bergdahl <i>et al.</i>, 2010 Björ <i>et al.</i>, 2015 Hedlund <i>et al.</i>, 2010 www.mining-technology.com/projects/malmberget)</p> <p>Kiruna, nord de la Suède (Bergdahl <i>et al.</i>, 2010)</p>	<p><i>Malmberget</i> : Roches volcaniques précambriennes métamorphosées en gneiss (roche métamorphique contenant quartz, mica, feldspaths plagioclases et parfois feldspath alcalin). Minerai de Malmberget : principalement, magnétite avec petites quantités d'hématite. Couche rocheuse dans partie ouest : 4-6 ppm uranium; section sud-est : 2-3 ppm uranium. Constituant principal du minerai : magnétite (certaines régions contiennent quantités notables d'hématite). Teneur en apatite varie considérablement d'un gisement à l'autre, avec concentration moyenne de phosphore < 0,8 %.</p> <p><i>Kiruna</i> : apatite-oxydes de fer Minerai composé principalement de magnétite (Fe₃O₄) avec petites quantités d'apatite (6 %). Teneur en uranium du minerai plus faible que celle de Malmberget.</p>	<p>Radon, diesel et quartz</p>	<p><u>Silice</u> N=3239 mesures de poussière respirable Teneur moyenne en quartz= 2,5 % (étendue 2,0-3,0 %)</p> <p><u>Radon</u> Jusqu'en 1960, niveau souterrain évalué à 380 Bq/m³ Augmentation linéaire supposée ad 1970. Entre 1970 et 1973, niveau moyen évalué à 1904 Bq/m³ À partir de 1974, variations d'année en année.</p>
<p>Bassin de la Lorraine, France (Pham <i>et al.</i>, 1992 http://www4.ac-nancy-metz.fr/base-geol/annexe.php?id=18&numpage=1)</p>	<p>Minerai pauvre en fer : 27 à 40 % de fer (Fe₂O₃), 4 à 22 % de silice (SiO₂), 1 à 9 % d'alumine (Al₂O₃), 3 à 19 % de chaux (CaO) et 0,5 à 1,7 % d'anhydride phosphorique (P₂O₅)</p>	<p>Exposition non chiffrée : oxydes de fer, radon et émissions de moteurs diesels. Risque minime du radon</p>	<p>Poussières totales : 0,5-18 mg/m³ Poussières ≤ 5µm : 0,1-2,5 mg/m³</p>

CG : cummingtonite-grunérite; AT actinolite-trémolite; EDS ou EDS : *Energy dispersive X-ray spectrometry* (Analyse dispersive en énergie); MET : microscopie électronique à transmission; SAED : *Selected area electron diffraction* (Diffraction des électrons en aire sélectionnée); WL : working level; WLM : working level months

ANNEXE D : RÉSUMÉS DES DONNÉES GÉOLOGIQUES ET MINÉRALOGIQUES

D.I Caractérisation minéralogique des mines d'or québécoises – Analyse minéralogique détaillée

# lame	Amp	% Amp	Φ min (µm)	Φ max (µm)	Φ moy (µm)	% Aig.	Commentaires
K-01	non	0				0	Rien à signaler
K-02	Act	5	voir K-04			5	Act sous forme de prismes allongés. Présence d'Act dégradée en aiguilles courtes.
K-03	Act	35	121	1223	518	5	Act sous forme de gros prismes allongés.
K-04	Act	15	5	71	30	15	Act sous forme de prismes trapus. Présence d'Act dégradée en aiguilles courtes.
K-05	Act	45	54	518	194	45	Act sous forme de gros prismes allongés.
K-06	Act	50	173	443	275	35	Act sous forme de gros prismes allongés.
K-07	Act	5	voir K-04			5	Act sous forme de prismes allongés. Présence d'Act dégradée en aiguilles courtes.
K-08	Act	10	51	436	148	10	Act en prismes allongés.
K-09	Act	10	Voir K-04			10	Act sous forme de prismes trapus. Présence d'Act dégradée en aiguilles courtes.
L-01	non	0				0	Rien à signaler
L-02	Act	20	5	554	175	20	Act sous forme de prismes allongés. Présence d'Act dégradée en aiguilles.
L-03	Act	60	1	650	206	60	Act sous forme de prismes allongés, localement dégradée en aiguilles. En amas finement aciculaire aux épontes de la veine de Quartz.
M-01	Hbl/ Act	70	5	48	23	70	Act/Hbl en courtes aiguilles.
M-02	non	0	-	-	-	0	Rien à signaler
X-01	Act	20	75	477	220	0	Act sous forme de prismes trapus à allongés
X-02	Act	15	85	1193	388	0	Act sous forme de prismes trapus à allongés
X-03	non	0				0	Rien à signaler
X-04	non	0				0	Rien à signaler
X-05	non	0				0	Rien à signaler
X-06	non	0				0	Rien à signaler
B-02	Hbl	10	voir B-03			10	Hbl prismatique allongée à aciculaire
B-03	Hbl	20	1	61	15	20	Hbl prismatique allongée à aciculaire
C-01	non	0				0	Principalement de la chlorite en feuillets ou tabulaire.
C-02	non	0				0	Rien à signaler

# lame	Amp	% Amp	Φ min (µm)	Φ max (µm)	Φ moy (µm)	% Aig.	Commentaires
D-01	Hbl	20	1	9	3	20	Hbl prismatique allongée à aciculaire
D-04	non	0				0	Rien à signaler
E-02	non	0				0	Rien à signaler
E-03	non	0				0	Rien à signaler
F-01	Hbl	10				10	Amphiboles qui semblent se dégrader en aiguilles
H-01	non	0				0	Présence de chlorite en fins feuillets.
I-01	non	0				0	Rien à signaler
I-02	non	0				0	Rien à signaler
I-03	Act	30	1	5	3	30	Act qui se dégrade en aiguilles et en fibres

Act, actinolite; Aig, aiguille; Amp, amphibole; Hbl, hornblende;
Φ, diamètre; min, minimal; max, maximal; moy, moyen

D.II Caractérisation minéralogique des mines d'or canadiennes – Analyse minéralogique détaillée

# lame	Amp	% Amp	Φ min (µm)	Φ max (µm)	Φ moy (µm)	% Aig	Commentaires
J-01	Ath/Tr	20				20	Trémolite/anthophyllite en prismes allongés, parfois aciculaires.
J-02	Gru	20				20	Gru en amas radiés finement aciculaire à fibreux.
J-03	Gru	15				15	Gru en amas finement aciculaire à fibreux.
J-04	Gru	15				15	Gru en amas fibreux. Fibres longues et fines.
J-05	Gru	15				15	Gru aciculaire à fibreuse
J-06	Gru	40	0,2	5	1	40	Gru de forme prismatique qui se dégrade en fibres longues et fines.
J-07	non	0				0	Rien à signaler
J8	non	0				0	Rien à signaler
N1	Act/Hbl	10				0	Act et Hbl sous forme de prismes trapus à allongés.
N2	non	0				0	Rien à signaler
N3	Act	10				10	Act en amas fibroradié de courtes aiguilles trapues.

Act, actinolite; Aig, aiguille; Amp, amphibole; Ath, anthophyllite; Gru, grunérite; Hbl, hornblende; Tr, trémolite;

Φ, diamètre; min, minimal; max, maximal; moy, moyen

D.III Caractérisation minéralogique des mines de fer québécoises – Analyse minéralogique détaillée

# lame	Amp	% Amp	Φ min (µm)	Φ max (µm)	Φ moy (µm)	% Aig.	Commentaires
A-01	Act	60				0	Act sous forme de prismes trapus.
A-02	non	0				0	Rien à signaler
A-03	Act	15				0	Act sous forme de prismes trapus.
G-01	non	0				0	Rien à signaler
G-02-A	non	0				0	Rien à signaler

Aig, aiguille; Act, actinolite; Amp, amphibole;
Φ, diamètre; min, minimal; max, maximal; moy, moyen