

Université de Montréal

Modélisation de l'exposition à la silice cristalline dans le secteur de la
construction

Par

Jean-François Sauvé

Département de santé environnementale et santé au travail

Faculté de Médecine

Mémoire présenté à la Faculté de Médecine en vue de l'obtention du
grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en Santé environnementale et santé
au travail

Décembre 2011

© Jean-François Sauvé, 2011

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
Modélisation de l'exposition à la silice cristalline dans le secteur de la
construction

présenté par
Jean-François Sauvé

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

André Dufresne, président-rapporteur

Yvette Bonvalot, membre du jury

Jérôme Lavoué, directeur de recherche

Michel Gérin, codirecteur de recherche

RÉSUMÉ

L'exposition prolongée par inhalation à des poussières de taille respirable contenant de la silice cristalline est reconnue pour causer des maladies respiratoires dont le cancer du poumon et la silicose. De nombreuses études ont relevé la surexposition des travailleurs de la construction à la silice cristalline, puisque ce composé est présent dans de nombreux matériaux utilisés sur les chantiers. L'évaluation de l'exposition à la silice cristalline dans cette industrie constitue un défi en raison de la multitude de conditions de travail et de la nature éphémère des chantiers. Afin de mieux cerner cette problématique, une banque de données d'exposition professionnelle compilée à partir de la littérature a été réalisée par une équipe de l'Université de Montréal et de l'IRSST, et constitue le point de départ de ce travail.

Les données présentes dans la banque ont été divisées en fonction de la stratégie d'échantillonnage, résultant en deux analyses complémentaires ayant pour objectif d'estimer les niveaux d'exposition sur le quart de travail en fonction du titre d'emploi, et selon la nature de la tâche exécutée. La méthode de Monte Carlo a été utilisée pour recréer les échantillons provenant de données rapportées sous forme de paramètres de synthèse. Des modèles Tobit comprenant les variables de titre d'emploi, tâche exécutée, durée, année et stratégie d'échantillonnage, type de projet, secteur d'activité, environnement et moyens de maîtrise ont été développés et interprétés par inférence multimodèle.

L'analyse basée sur le quart de travail a été réalisée à partir de 1346 données d'exposition couvrant 11 catégories de titre d'emploi. Le modèle contenant toutes les variables a expliqué 22% de la variabilité des mesures et la durée, l'année et la stratégie d'échantillonnage étaient d'importants prédicteurs de l'exposition. Les chantiers de génie civil et les projets de nouvelle construction étaient associés à des expositions plus faibles, alors que l'utilisation de moyens de

maîtrise diminuait les concentrations de 18% à l'extérieur et de 24% à l'intérieur. Les moyennes géométriques les plus élevées prédites pour l'année 1999 sur 8 heures étaient retrouvées chez les foreurs (0.214 mg/m^3), les travailleurs souterrains (0.191 mg/m^3), les couvreurs (0.146 mg/m^3) et les cimentiers-applicateurs (0.125 mg/m^3).

1566 mesures réparties en 27 catégories de tâches étaient contenues dans la seconde analyse. Le modèle contenant toutes les variables a expliqué 59% des niveaux d'exposition, et l'ensemble des variables contextuelles étaient fortement prédictives. Les moyennes géométriques prédites pour l'année 1998 et selon la durée médiane par tâche dans la banque de données étaient plus élevées lors du bouchardage du béton (1.446 mg/m^3), du cassage de pièces de maçonnerie avec autres outils (0.354 mg/m^3), du décapage au jet de sable (0.349 mg/m^3) et du meulage de joints de brique (0.200 mg/m^3). Une diminution importante des concentrations a été observée avec les systèmes d'arrosage (-80%) et d'aspiration des poussières (-64%) intégrés aux outils.

L'analyse en fonction des titres d'emploi a montré une surexposition généralisée à la valeur guide de l'ACGIH et à la norme québécoise, indiquant un risque à long terme de maladies professionnelles chez ces travailleurs. Les résultats obtenus pour l'évaluation en fonction de la tâche exécutée montrent que cette stratégie permet une meilleure caractérisation des facteurs associés à l'exposition et ainsi de mieux cibler les priorités d'intervention pour contrôler les niveaux d'exposition à la silice cristalline sur les chantiers de construction durant un quart de travail.

Mots-clés : silice cristalline, banques de données d'exposition professionnelle, construction, évaluation de l'exposition

ABSTRACT

Chronic inhalation of respirable inorganic dusts containing crystalline silica is linked to occupational respiratory diseases such as lung cancer and silicosis. Several studies have documented the overexposure to respirable crystalline silica in construction workers, as this compound is found in several building materials and many operations can release fine suspended particles. Comprehensive quantitative exposure assessment in this industry is challenging due to the variety in tasks performed, materials used and environmental conditions between work sites, the mobile workforce and the temporary nature of construction sites. An occupational exposure database of silica exposure was compiled from the literature by a research group from the Université de Montréal and the Institut de recherche en santé et en sécurité du travail (IRSST) to address this issue.

The exposure data contained in the database were separated on the basis of sampling strategies, which resulted in two separate – but complementary – analyses. The first analysis was restricted to samples collected to compare levels with an occupational exposure limit, in order to estimate work-shift respirable crystalline silica exposure by construction trade. The second analysis used measurements collected under a task-based sampling strategy in order to estimate the exposure levels associated with specific activities. Monte-Carlo simulation was used to recreate individual exposures from measurements reported as summary statistics. Modeling was performed using Tobit models within a multimodel inference framework, with construction trade, task, sampling duration, year and strategy, project type, construction sector, workspace and control methods as potential predictors.

The dataset for the analysis by construction trade was comprised of 1346 exposure measurements and included 11 trade categories. The model containing all the variables

explained 22% of the exposure variability and the sampling duration, year and strategy were identified as important predictors. Civil engineering and roadwork sites as well as new construction projects were associated with lower exposure levels, while the use of control methods reduced silica concentrations by 18% outdoors and 24% indoors. Predicted geometric means (GM) for year 1999 were the highest for drillers (0.214 mg/m^3), underground workers (0.191 mg/m^3), roofers (0.146 mg/m^3) and cement grinders/finishers (0.125 mg/m^3), based on a 8-hour shift. Heavy equipment operators (0.041 mg/m^3) and foremen (0.047 mg/m^3) had the lowest predicted GMs.

1566 task-based measurements, representing 27 task categories, were included in the activity-specific dataset. The proportion of variance explained by the model containing all the variables was 59%, and all the variables investigated had a strong influence on the exposure levels. Predictions were made based on the year 1998 and the median duration by task in the dataset. The largest predicted GMs were associated with the following operations: scabbling concrete (1.446 mg/m^3), chipping with other tools (0.354 mg/m^3), abrasive blasting (0.349 mg/m^3) and tuck point grinding (0.200 mg/m^3). Important reductions in exposure levels were found with the use of tool-integrated water sprays (-80%) and local exhaust ventilation (-64%).

Important overexposure to the ACGIH Threshold Limit Value and the Québec exposure limit was found for all the trades investigated, indicating a long-term risk of silica-related occupational diseases. The results of the task-based analysis suggest that this sampling strategy provides a better characterization of the factors affecting exposure and the impacts of engineering dust control methods to control long-term exposure levels.

Keywords : crystalline silica, occupational exposure database, construction, exposure assessment

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	XV
REMERCIEMENTS.....	XVI
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE DE L'EXPOSITION À LA SILICE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION	1
1.1. Mise en contexte	2
1.2. La silice cristalline	2
1.3. Exposition professionnelle à la silice dans le secteur de la construction	4
1.4. Variabilité de l'exposition à la silice dans le secteur de la construction	5
1.5. Sources de données d'exposition professionnelle préexistantes.....	7
1.6. Banque de données québécoise d'exposition professionnelle à la silice.....	9
1.7. Modélisation statistique des données d'exposition	9
1.8. Objectifs du travail.....	11
1.9. Organisation du mémoire.....	11

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DES ARTICLES	13
2.1. Description de la banque de données d'exposition à la silice	14
2.2. Méthodologie	17
2.2.1. Sélection des données propres aux objectifs	17
2.2.2. Traitement des valeurs d'exposition rapportées sous forme de paramètres de synthèse	18
2.2.3. Présentation de l'approche d'inférence multimodèle	20
2.2.4. Sélection des variables.....	22
2.2.5. Définition des indices d'exposition relatifs et scénarios de prédictions	26
2.2.6. Traitement des valeurs d'exposition non-détectées.....	27
2.3. Contribution des auteurs	28
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SUR UN QUART DE TRAVAIL EN FONCTION DU TITRE D'EMPLOI	30
3.1. Abstract.....	32
3.2. Introduction	33
3.3. Materials and methods.....	35
3.3.1. Database preparation	35
3.3.2. Summarized exposure levels	36
3.3.3. Descriptive statistics	37
3.3.4. Statistical modeling.....	37
3.4. Results.....	41

3.4.1. Descriptive statistics	41
3.4.2. Statistical modeling.....	45
3.4.3. Determinants of exposure	47
3.4.4. Predicted exposures for trades.....	48
3.5. Discussion	50
3.5.1. Descriptive analysis.....	50
3.5.2. Statistical modeling.....	51
3.5.3. Determinants of exposure	51
3.5.4. Predicted exposures for trades.....	53
3.5.5. Unreported data	54
3.6. Conclusion.....	54
3.7. References	56
CHAPITRE 4 : ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE	
SELON LA NATURE DE LA TÂCHE EXÉCUTÉE	62
4.1. Abstract.....	64
4.2. Introduction	65
4.3. Methods.....	67
4.3.1. Exposure database.....	67
4.3.2. Database preparation	67
4.3.3. Summarized exposure levels	68
4.3.4. Descriptive statistics	69

4.3.5. Modeling	70
4.4. Results.....	73
4.4.1. Descriptive statistics	73
4.4.2. Modeling.....	76
4.4.3. Effects of exposure determinants.....	76
4.4.4. Estimated exposure levels by task.....	80
4.5. Discussion	82
4.5.1. Descriptive statistics	82
4.5.2. Modeling.....	83
4.5.3. Effects of exposure determinants.....	85
4.5.4. Estimated exposure levels by task.....	86
4.5.5. Study limitations	88
4.6. Conclusion.....	89
4.7. References	91
CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE	98
5.1. Circonstances d'exposition couvertes par les deux analyses	99
5.2. Simulation des expositions individuelles par la méthode de Monte-Carlo.....	100
5.3. Modélisation des données d'exposition.....	101
5.4. Effets des déterminants de l'exposition	104
5.5. Analyse des niveaux d'exposition à la silice.....	109
5.6. Limites de ce travail	112

5.6.1. Limites liées au manque de documentations des facteurs reliés à l'exposition 112

5.6.2. Limites liées à la représentativité et distribution des données d'exposition 114

5.7. Conclusion..... 116

BIBLIOGRAPHIE118

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1: INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE DE L'EXPOSITION À LA SILICE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

Tableau 1.1: Répartition par secteur des travailleurs de la construction potentiellement exposés à la silice cristalline au Québec	4
--	---

CHAPITRE 2: PRÉSENTATION DES ARTICLES

Tableau 2.1: Sommaire des informations contenues dans la banque de données d'exposition	16
---	----

Tableau 2.2: Variables incluses dans les ensembles de modèles	24
---	----

CHAPITRE 3: ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SUR UN QUART DE TRAVAIL EN FONCTION DU TITRE D'EMPLOI

Tableau 3.1: Descriptive statistics of the dataset	44
--	----

Tableau 3.2: Structure and weights of the 5 best models	45
---	----

Tableau 3.3: Coefficients from the multimodel inference procedure, averaged over 20 iterations.....	46
---	----

Tableau 3.4: Relative indices of exposure of the different project types and construction sectors.....	47
--	----

Tableau 3.5: Relative indices of exposure of the use of control methods by workspace	48
--	----

Tableau 3.6: Fractions of exposures expected to exceed the ACGIH TLV and Québec OEL by trade based on predicted geometric means and residual standard deviation.....	49
--	----

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SELON LA NATURE DE LA TÂCHE EXÉCUTÉE

Tableau 4.1: Respirable silica concentrations, proportion of non-detects and measurements derived from summary statistics and median sampling durations by exposure variables.....	74
Tableau 4.2: Coefficients from the multimodel inference procedure, averaged over 20 iterations.....	77
Tableau 4.3: Relative indices of exposure of construction sectors, project types and control methods	79

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 3: ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SUR UN QUART DE TRAVAIL EN FONCTION DU TITRE D'EMPLOI

Figure 3.1: Predicted GMs and 95% confidence interval of quartz exposure by trade49

CHAPITRE 4: ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SELON LA NATURE DE LA TÂCHE EXÉCUTÉE

Figure 4.1: Estimated geometric mean silica exposure by task, based on the median sampling duration by task and averaged across 20 iterations.....81

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AICc	Akaike Information Criterion (corrected)
BDEP	Banque de Données d'Exposition Professionnelle
CI	Intervalle de confiance
CSST	Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail
ÉTG	Écart-Type Géométrique
ÉTR	Écart-Type Relatif
GM	Geometric Mean
GSD	Geometric Standard Deviation
IARC	International Agency for Research on Cancer
IMIS	Integrated Management Information System
InVS	Institut de Veille Sanitaire
LEV	Local Exhaust Ventilation
LOD	Limit of Detection
MG	Moyenne Géométrique
mg/m ³	Milligramme par mètre cube
min.	Minute
ND	Non détecté
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OEDB	Occupational Exposure Database
OEL	Occupational Exposure Limit
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
R ²	Coefficient de détermination
RIE	Relative Index of Exposure
ROS	Regression on Order Statistics
RSD	Relative Standard Deviation
RSST	Règlement sur la Santé et la Sécurité du Travail
TLV	Threshold Limit Value
TWA	Time Weighted Average
VOC	Volatile Organic Compound(s)

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Jérôme Lavoué et Michel Gérin qui m'ont offert la chance de poursuivre mes études supérieures en janvier 2010. Leur dévouement, au cours des deux dernières années, a été essentiel à la réalisation de ce projet, qui a pu, grâce à leur apport, maintenir une perspective de prévention des maladies professionnelles malgré sa nature plutôt technique et ce, de l'élaboration du protocole de recherche à la révision des écrits. Ils m'ont aussi fourni les ressources et outils nécessaires afin que je puisse me dédier entièrement à cette aventure, et présenter les résultats de ce travail à travers le globe, de Trois-Rivières à Oxford.

J'aimerais également remercier Charles Beaudry, qui s'est toujours montré disponible pour répondre à mes questions sur la banque de données, les sources documentaires et les autres aspects touchant à la silice cristalline en hygiène du travail.

Je tiens à remercier mes parents, qui ont toujours eu l'éducation à cœur et qui m'ont encouragé à poursuivre mon cheminement académique. Je remercie du fond du cœur Edith, pour son amour et ses encouragements tout au long des sept dernières années.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE DE L'EXPOSITION À LA SILICE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION

1.1. Mise en contexte

L'industrie de la construction représente approximativement 6% du produit intérieur brut au Québec (Institut de la statistique du Québec 2010) et plus de 150 000 salariés (Commission de la Construction du Québec 2011). Ces travailleurs sont répartis sur une vaste gamme de chantiers, allant de la rénovation domiciliaire aux mégachantiers tels les 2 hôpitaux universitaires montréalais ou les futurs projets de remplacement de l'échangeur Turcot et du pont Champlain.

Les activités liées à la construction, rénovation et démolition de bâtiments et autres ouvrages peuvent présenter plusieurs dangers de nature physique (bruit, contraintes thermiques et électrocution) (Burkhart et coll. 1993; Ringen et coll. 1995), chimique (composés organiques volatils, plomb, amiante, etc.) (Tibbetts 2002), en plus des troubles musculo-squelettiques et des chutes (Ringen et coll. 1995; Dement et Lipscomb 1999; Huang et Hinze 2003). Le secteur de la construction était l'industrie comportant la plus grande proportion de décès indemnisés pour trauma, et la deuxième en importance pour les décès indemnisés liés aux maladies professionnelles entre 2000 et 2002 (Duguay et Massicotte 2007). Depuis 2007, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) met en place le Plan d'action Construction ciblant 5 dangers de « tolérance zéro », soit les risques de chutes, d'effondrement et d'électrocution, ainsi que l'exposition à l'amiante et à la silice cristalline (CSST 2011).

1.2. La silice cristalline

L'exposition prolongée par inhalation à des poussières contenant de la silice cristalline est associée depuis plus d'un siècle à la silicose, une fibrose pulmonaire découlant de processus inflammatoires suite à la déposition de particules de silice dans les alvéoles (Stellman 2003;

Rimal et coll. 2005). L'exposition à la silice cristalline augmente également le risque de cancer du poumon (CIRC 1997; Straif et coll. 2009) et de maladie pulmonaire obstructive chronique (NIOSH 2002; Rushton 2007). Certaines études ont également associé l'exposition à la silice cristalline au développement du lupus érythémateux disséminé (Parks et Cooper 2006), de l'arthrite rhumatoïde (Oliver et Silman 2006) et de la sclérodermie généralisée (Nikpour et coll. 2010). Par contre, plusieurs facteurs génétiques et environnementaux peuvent intervenir dans le développement de ces maladies et beaucoup moins d'études ont évalué leur lien avec la silice cristalline, comparativement à la silicose et au cancer du poumon.

La silice cristalline est présente dans la majorité des formations rocheuses et retrouvée principalement en tant que quartz¹, en plus de polymorphes tels la cristobalite et la tridymite qui sont formés à de hautes températures (CIRC 1997; Moore 1999). La silice se retrouve également dans de nombreux matériaux de construction tels le béton, le mortier, la brique et la céramique (Lavender 1999). Plusieurs tâches réalisées sur les chantiers de construction, par exemple le sciage, le meulage et le cassage de pièces de maçonnerie, peuvent donc produire des poussières contenant de la silice en suspension dans l'air (Linch et Cocalis 1994). Le nombre de travailleurs de la construction au Québec potentiellement exposés à la silice est estimé à 46 000 par CAREX Canada (Peters et coll. 2010), répartis selon les 4 groupes présentés au Tableau 1.1.

¹ Afin d'alléger le texte, le terme « silice » indique la silice cristalline (quartz) respirable.

Tableau 1.1: Répartition par secteur des travailleurs de la construction potentiellement exposés à la silice cristalline au Québec

Groupe	N
Entrepreneurs spécialisés	30 000
Construction de bâtiments	11 000
Travaux de génie civil	3 900
Travaux de voirie	1 100

Source : Peters et coll. (2010)

1.3. Exposition professionnelle à la silice dans le secteur de la construction

La reconnaissance des dangers liés à la silice au début du 20^{ème} siècle a mené à l'établissement de valeurs limites d'exposition et la mise en place de stratégies de maîtrise de l'exposition, résultant en une diminution importante des concentrations dans de nombreuses industries (Madl et coll. 2008). Malgré ces progrès, la surexposition des travailleurs du secteur des bâtiments et travaux publics a été constatée dans de nombreuses études récentes. Parmi celles-ci, une étude de Rappaport et coll. (2003) réalisée sur 36 chantiers aux États-Unis a montré une fréquence de dépassement² de la valeur limite sanitaire de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) située entre 64.5 % et 100 % chez les peintres, briqueteurs-maçons, journaliers et opérateurs-ingénieurs. Similairement, les 8 métiers, ainsi que 13 des 16 tâches de la banque de données compilée par Flanagan et coll. (2006), regroupant 1374 mesures de silice, étaient associés à une moyenne géométrique supérieure à la valeur de l'ACGIH. La valeur sanitaire de l'ACGIH en vigueur lors de ces deux études était de 0,05 mg/m³, alors qu'elle se situe aujourd'hui à 0,025 mg/m³ (ACGIH 2010).

² Probabilité qu'une exposition soit supérieure à une valeur limite en fonction de la moyenne et de l'écart-type géométrique du profil d'exposition (Rappaport 1984)

Au Québec, un constat semblable aux études américaines a été relevé lors d'une étude réalisée en 2002 et 2003 pour le compte de la Direction de santé publique de Montréal (Forest et Tremblay 2007). Près de la moitié des 120 mesures prises sur 18 chantiers étaient supérieures à $0,1 \text{ mg/m}^3$, soit la valeur d'exposition admissible en vertu du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (Gouvernement du Québec 2011). Cette étude a également mis en évidence l'importance de l'exposition chez des travailleurs n'effectuant pas de tâches générant de la poussière, due à l'exécution de tâches poussiéreuses par d'autres travailleurs à proximité, un fait également relevé dans certaines autres études (Hallin 1983; Lofgren 1993).

1.4. Variabilité de l'exposition à la silice dans le secteur de la construction

L'étude réalisée par Forest et Tremblay a permis de documenter la contribution de nombreux facteurs dont les tâches exécutées, l'environnement de travail et la teneur en silice des matériaux sur les niveaux d'exposition. Par contre, les auteurs ont relevé que leur étude ne couvrait qu'un nombre limité de circonstances associées à l'exposition à la silice sur les chantiers, malgré la quantité importante de données recueillies. Le lien entre les résultats obtenus et le profil d'exposition à long terme des travailleurs du domaine du bâtiment et travaux publics est donc incertain en raison de l'importante variabilité dans les conditions de travail et les activités réalisées. Cette limite a également été relevée dans d'autres études, visant à documenter les niveaux d'exposition sur les chantiers, notamment celles de Chisholm (1999), Tjoe Nij et coll. (2002) et Verma et coll. (2003). La variabilité dans les niveaux d'exposition se reflète dans les écarts-types géométriques (ÉTG) élevés observés dans l'analyse de Flanagan et coll. (2006). Par exemple, une seule catégorie d'outils et de tâches présentes dans leur banque de données d'exposition au quartz respirable avaient un ÉTG inférieur à 3. De

plus, toutes les catégories de métiers avaient un ÉTG supérieur à 4, avec une médiane de 5,4. Or, un ÉTG inférieur à 3 indique généralement un groupe d'exposition homogène (INRS 2005) et un contrôle des sources de variabilité de l'exposition. (Wambach 2002). Il est donc difficile d'établir des groupes similaires dans ce contexte et de tirer des conclusions quant au profil d'exposition des travailleurs de la construction à la silice lors d'enquêtes approfondies du milieu de travail à partir d'un nombre limité de mesures.

L'analyse de plus de 20 000 données d'exposition à de nombreux contaminants par Kromhout et coll. (1993) a révélé que la variabilité dans les niveaux entre les journées était plus élevée lorsque les tâches sont effectuées de façon intermittente durant le quart de travail et quand les travailleurs sont exposés à l'extérieur. Or, la nature, la durée et la fréquence des tâches exécutées par les travailleurs sur les chantiers peut varier entre les journées, notamment en fonction des différentes phases des projets de construction (Hallin 1983; Susi et Schneider 1995; Susi et coll. 2000). Certaines opérations peuvent également impliquer des matériaux qui ne contiennent pas de silice, et l'exposition à ce contaminant ne dure pas nécessairement durant tout le quart de travail (Valiante et coll. 2004). De plus, la nature même des chantiers de construction fait qu'ils sont constamment en évolution et requièrent une main d'œuvre temporaire pour les différentes étapes du projet (Lumens et Spee 2001; Woskie et coll. 2002). Les travailleurs peuvent donc œuvrer sur de nombreux sites, et ceux-ci peuvent avoir des caractéristiques différentes quant à la taille du projet, l'environnement de travail, les types de matériaux, et d'autres facteurs qui peuvent avoir une influence importante sur l'exposition à la silice (Chisholm 1999; Lumens et Spee 2001). Les niveaux d'exposition mesurés dans le cadre d'une enquête sur un chantier ne sont donc pas nécessairement applicables à un autre site, ou sur le même chantier à une période ultérieure compte tenu de la variabilité importante dans les conditions de travail (Verma et coll. 2003). Ainsi, l'échantillonnage des

travailleurs couvrant la totalité des circonstances potentiellement associées à l'exposition à la silice dans le secteur de la construction nécessiterait des ressources humaines et financières considérables.

1.5. Sources de données d'exposition professionnelle préexistantes

En raison de l'importante variabilité dans les tâches exécutées, des matériaux utilisés et des conditions de travail sur les chantiers de construction, les études individuelles ne couvrent qu'un cadre très restreint des circonstances associées à l'exposition à la silice. Une approche permettant de pallier à cette limite consiste à effectuer une méta-analyse de l'ensemble des études individuelles pour en tirer des conclusions et orienter la prise de décision avec une plus grande certitude (Bero et Jadad 1997; Egger et Smith 1997; Normand 1999). Les sources de données d'exposition professionnelle disponibles, outre les articles de périodiques scientifiques, incluent les résultats d'enquêtes en milieu de travail réalisées par le National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH). Celles-ci ont été utilisées entre autres pour évaluer l'exposition au trichloréthylène (Bakke et coll. 2002), aux fumées d'asphalte (Burstyn et coll. 2002) et aux fluides de coupe des métaux (Park et coll. 2009). Certaines études ont également utilisé des données provenant d'entreprises privées, permettant notamment de suivre l'évolution dans le temps des niveaux d'exposition au sein de milieux de travail similaires (Cherrie et coll. 2001; Rushton et Betts 2001; Agostini et coll. 2010). Finalement, les banques de données dont l'Integrated Management Information System (IMIS) (Stewart et Rice 1990), COLCHIC (Vincent et Jeandel 2001) et MEGA (Stamm 2001; Birk et coll. 2010) contiennent des milliers de mesures d'exposition à de nombreux contaminants réparties sur plusieurs décennies, permettant leur utilisation lors d'études rétrospectives notamment.

Les résultats contenus dans ces différentes sources de données peuvent être utilisés à des fins de surveillance (incluant les tendances temporelles), d'analyse du risque et de l'établissement ou réévaluation de valeurs limites d'exposition (Marquart et coll. 2001; Tielemans et coll. 2002; Yassin et coll. 2005; Creely et coll. 2006; Kauffer et Vincent 2007). Les données d'exposition existantes sont également de plus en plus utilisées dans les études épidémiologiques de devis cas-témoin (Stewart et Rice 1990; Teschke et coll. 1999; Burstyn et coll. 2000a; Teschke et coll. 2002; Hein et coll. 2008; Hein et coll. 2010; Peters et coll. 2011a) pour lesquelles l'exposition rétrospective doit être estimée pour de multiples professions et activités industrielles. En dernier lieu, ces données permettent aussi caractériser l'influence des déterminants de l'exposition (Burstyn et coll. 2000b; Lavoué et coll. 2005).

Le comité Construction de l'ACGIH a lancé en 2001 une initiative visant à regrouper les mesures d'exposition à la silice provenant du secteur privé, institutionnel et public, dans une banque de données afin de créer un guide permettant d'estimer les niveaux d'exposition en fonction des activités réalisées (Becker et coll. 2001). Ce projet a permis de récolter 1374 mesures de quartz respirable et 1394 mesures de poussières respirables, prélevées en zone respiratoire, en plus de 178 échantillons en ambiance (Flanagan et coll. 2006). La majorité des données d'exposition provenait d'organismes réglementaires, c'est-à-dire des échantillons récoltés lors d'inspections visant à établir la conformité légale de l'entreprise. Les auteurs ont par contre relevé que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour caractériser les facteurs associés aux fortes expositions et l'impact des moyens de maîtrise.

1.6. Banque de données québécoise d'exposition professionnelle à la silice

Afin d'identifier les tâches, postes et conditions de travail les plus à risques de surexposition, et également documenter l'efficacité des moyens de maîtrise des poussières à la source, une banque de données d'exposition professionnelle (BDEP) à la silice a été créée par une équipe de l'Université de Montréal et de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (Beaudry et coll. 2011). Celle-ci contient plus de 6000 résultats provenant de 116 sources documentaires, couvrant la période 1988 à 2007, et représente plus de 11000 mesures d'exposition individuelles. Chaque résultat dans la banque est associé à plusieurs paramètres rapportés dans la source documentaire permettant l'interprétation des données d'exposition. Ces paramètres incluent notamment les déterminants (p.ex. métier, tâche exécutée, caractéristiques du chantier), le type de contaminant (p.ex. quartz, poussières) et fraction échantillonnée, la méthodologie employée lors du prélèvement et de l'analyse et les informations relatives à la source documentaire. Une analyse descriptive de la BDEP réalisée par les auteurs a permis de classer les métiers, tâches, outils et matériaux en fonction des niveaux d'exposition associés à l'aide de statistiques univariées (p.ex. moyennes et écarts-types géométriques). Ces auteurs ont également recommandé l'application d'analyses statistiques multivariées afin de raffiner les conclusions quant au portrait de l'exposition à la silice sur les chantiers de construction.

1.7. Modélisation statistique des données d'exposition

Puisque l'exposition à la silice dans le secteur de la construction dépend de plusieurs facteurs combinés, des analyses plus poussées sont nécessaires pour dissocier l'effet des différents éléments sur les concentrations rapportées en tant que statistiques univariées. Les modèles de régression linéaires multivariés permettent d'inclure plusieurs variables prédictives

de l'exposition afin d'estimer leurs contributions sur l'exposition à des agents chimiques ou physiques en milieu de travail (Burstyn et Teschke 1999; Burdorf 2005). Cette approche consiste à expliquer une variable de réponse – les niveaux d'exposition dans ce cas-ci – à partir d'une ou de plusieurs covariables, soit les déterminants potentiels de l'exposition à la silice pour ce travail.

Les modèles de régression linéaires peuvent également être étendus avec l'inclusion d'effets aléatoires, permettant notamment de dissocier la variabilité inter et intra-travailleurs (Kromhout et coll. 1993; Rappaport et coll. 1993) ou de tenir compte de la corrélation entre les données provenant d'une même source (Lavoué et coll. 2007; Lavoué et coll. 2011) ou d'un même établissement (Lavoué et coll. 2006; Scarselli et coll. 2011). La modélisation peut également prendre en considération les concentrations non détectées lors de l'analyse des échantillons dans l'estimation des paramètres, avec entre autres les modèles de régression Tobit, ou de maximum de vraisemblance (Helsel 2005; Hein et coll. 2010; Lavoué et coll. 2011).

Ces approches permettent de faire des prédictions sur les niveaux d'exposition en fonction de scénarios basés sur les particularités du milieu de travail à partir des paramètres de régression, et ainsi guider les hygiénistes et les organismes de santé au travail dans leurs priorités d'intervention. Les modèles prédictifs de l'exposition peuvent ainsi être des outils relativement peu coûteux dans l'arsenal disponible pour les intervenants dans la démarche d'anticipation et de prévention des risques à la santé au travail.

1.8. Objectifs du travail

L'objectif principal de ce travail consiste à estimer la contribution des différents déterminants de l'exposition à la silice dans le secteur de la construction à partir des mesures contenues dans la banque de données d'exposition à la silice dans une optique de prévention des maladies professionnelles.

Plus précisément, les objectifs de ce travail visent à :

- ❖ Estimer les concentrations en silice en fonction du titre d'emploi pour les données pertinentes pour la comparaison à une valeur limite d'exposition
- ❖ Évaluer les concentrations en silice en fonction de la nature de la tâche exécutée afin d'estimer leurs contributions sur le profil d'exposition sur le quart de travail
- ❖ Quantifier l'effet des autres déterminants de l'exposition (p.ex. l'environnement et les caractéristiques des chantiers), incluant la réduction des concentrations apportée par les moyens de maîtrise des poussières à la source.

1.9. Organisation du mémoire

Ce mémoire, divisé en cinq chapitres, présente au chapitre 1 la problématique de l'exposition à la silice dans le secteur de la construction. Le chapitre 2 décrit les méthodes utilisées dont la sélection des données, l'approche multimodèle et le traitement des valeurs non-détectées. Les deux chapitres suivants contiennent les articles en préparation formant le cœur de ce travail, soit l'analyse des niveaux d'exposition en fonction du titre d'emploi sur un quart de travail (Chapitre 3), et selon la nature de la tâche exécutée (chapitre 4). La discussion

générale et la conclusion quant à l'exposition à silice sur les chantiers de construction (chapitre 5) viennent clore ce mémoire.

CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DES ARTICLES

Ce mémoire est axé sur 2 articles en voie de soumission, *Statistical modeling of crystalline silica exposure by trade in the construction industry using a database compiled from the literature* traitant de l'exposition sur un quart de travail selon le titre d'emploi, et *Silica exposure during construction activities: statistical modeling of task-based measurements from the literature*, portant sur les tâches spécifiques. La mise en page de ces deux articles dans ce document respecte la forme des deux publications auxquels ils sont destinés, soit *Annals of Occupational Hygiene* pour le chapitre 3, et le *Journal of Environmental Monitoring* pour le chapitre 4. La présente section résume les éléments méthodologiques employés, dont plusieurs sont communs aux deux articles.

2.1. Description de la banque de données d'exposition à la silice

Les mesures d'exposition ayant servi aux analyses proviennent d'une banque de données d'exposition professionnelle (BDEP) à la silice dans le secteur de la construction, compilée par une équipe du département en santé environnementale et santé au travail de l'Université de Montréal et de l'IRSST (Beaudry et coll. 2011). Cette initiative avait pour objectif d'identifier les situations de surexposition et documenter l'efficacité des moyens de maîtrise des poussières à la source. Une revue de la littérature a d'abord été effectuée pour identifier les documents contenant des mesures d'exposition à la silice et aux poussières liées à des activités sur les chantiers, pour ensuite consigner ces mesures et les informations associées dans une banque de données. Au total, 6125 résultats couvrant la période de 1974 à 2008 et provenant de 116 sources documentaires sont contenus dans la BDEP. Ces 116 sources sont composées de rapports de recherche provenant d'organismes publics (69, provenant principalement du NIOSH); d'articles de périodiques scientifiques (45) et d'une portion de la banque de données de l'ACGIH (Flanagan et coll. 2006) et de la matrice emploi-exposition aux poussières

alvéolaires de silice cristalline de l'Institut de Veille Sanitaire français (InVS 2008). Les résultats numériques de l'exposition sont présents dans la BDEP sous forme de mesure unique, représentant un seul échantillon, ou sous forme agrégée, c'est-à-dire l'exposition de plusieurs travailleurs résumée sous forme de mesure de tendance centrale et/ou de dispersion (par exemple la moyenne et l'écart-type géométrique). La somme du nombre de mesures uniques et des tailles d'échantillon associées aux résultats présentés sous forme agrégée s'élève à 11637, incluant 4215 mesures de silice respirable prélevées en zone respiratoire.

Chaque mesure dans la BDEP est associée à plusieurs paramètres de nature contextuelle et méthodologique permettant son interprétation, présentés au Tableau 2.1. Dans le cas des titres d'emplois, ceux-ci ont été adaptés au contexte québécois en fonction des conventions collectives en vigueur. La définition des catégories de tâche, matériaux outils a également été uniformisée pour tenir compte de la réalité québécoise et pour faciliter l'analyse des niveaux d'exposition en fonction de ces variables. Par exemple, les matériaux définis comme des « gravillons », « pierres de taille », « roche » ou « rock » dans les sources de données ont été uniformisés en tant que « Pierre » dans la catégorie de matériaux normalisés. La description originale de ces éléments dans la source documentaire a également été incluse dans la banque de données. La BDEP contient au total 42 catégories de tâches normalisées et 30 titres d'emploi adaptés à la réalité québécoise selon les conventions collectives en vigueur. Un paramètre essentiel à l'interprétation des mesures d'exposition concerne la stratégie d'échantillonnage, qui peut être : évaluation de la conformité réglementaire de l'entreprise à la suite d'inspections, comparaison à une valeur limite sur huit heures sans portée légale, évaluation lors d'une tâche spécifique, évaluation du pire scénario (« worst case »). La stratégie attribuée à chaque mesure de la banque de données était généralement définie dans les publications; dans le cas contraire, elle a été assignée selon le jugement professionnel des

chercheurs. Une cote de qualité de l'information disponible sur les déterminants et la méthodologie a également été attribuée à chaque résultat pour orienter la sélection de données lors des analyses.

Les niveaux d'exposition moyens selon le titre d'emploi, tâches, outils et matériaux, en plus d'une revue de l'efficacité des différents moyens de maîtrise en fonction de la combinaison outil-matériau de construction sont présentés dans Beaudry et coll. (2011).

Tableau 2.1: Sommaire des informations contenues dans la banque de données d'exposition

Classe	N^A	Contenu
Source et qualité des données	4	Identifiant et type de source documentaire Cote de qualité des informations contextuelles
Tâche, titre d'emploi, outil et matériau	16	Description dans la référence Description standardisée ^B Contenu en silice du matériau Marque et modèle de l'outil
Caractéristiques du chantier	3	Classe et type de chantier standardisé ^B Environnement de travail
Données numériques de l'exposition	18	Taille d'échantillon Concentration rapportée (mesure unique, mesures de tendance centrale et de dispersion)
Métrologie et analyse	22	Nature du contaminant échantillonné et granulométrie Stratégie d'échantillonnage Zone, durée et année de prélèvement Méthode et instrument d'échantillonnage Méthode et type d'analyse
Moyens de maîtrise	9	Présence (oui/non) d'un moyen de maîtrise (ventilation locale ou générale, procédé humide, etc.)
Protection respiratoire	3	Fréquence d'utilisation Type d'appareil
Autre	2	Photo disponible et commentaires généraux

^A : Nombre de colonnes de la grille de saisie correspondant à la classe

^B : Informations adaptées au contexte québécois

2.2. Méthodologie

2.2.1. Sélection des données propres aux objectifs

Long (1953) distinguait il y a un demi-siècle deux types de stratégie d'échantillonnage dans l'industrie des mines de charbon pour la prévention des pneumoconioses: l'approche « routinière » visant à évaluer et contrôler périodiquement les concentrations dans l'air, et la « recherche » pour identifier les sources et méthodes de contrôle de l'exposition. Cette distinction a également été appliquée à ce travail, résultant en deux analyses séparées. La première visait en premier lieu l'exposition sur le quart de travail sur la base du titre d'emploi, plus représentative du risque de maladies professionnelles à long terme. Les données ayant pour objectif l'évaluation de l'exposition moyenne sur 8h à des fins de comparaison à une valeur limite – incluant les données d'inspection – ont donc été sélectionnées pour cette analyse (« banque Métiers »). La deuxième analyse contenait les mesures d'exposition associées à l'évaluation de l'exposition lors de tâches spécifique (« banque Tâches »), donc à plus court terme, afin d'estimer leur contribution à l'exposition sur le quart de travail et l'effet des moyens de contrôle des poussières.

Pour les deux sous-banques spécifiques de la BDEP, seuls les échantillons identifiés comme du quartz ou de la silice cristalline de fraction respirable et prélevés en zone respiratoire du travailleur ont été conservés. Les résultats dont la durée d'échantillonnage était manquante ont également été exclus des analyses, puisque celle-ci a été associée aux niveaux d'exposition dans de nombreuses analyses publiées (p. ex. Kolstad et coll. 2005; Meijster et coll. 2009; Park et coll. 2009). En dernier lieu, puisque ces deux analyses visaient à estimer l'exposition en fonction des titres d'emploi et des tâches réalisées, les résultats dont la description de ces paramètres était absente n'ont pas été retenus.

2.2.2. Traitement des valeurs d'exposition rapportées sous forme de paramètres de synthèse

Une des difficultés liées à l'analyse de banques de données d'exposition provenant de la littérature implique la présence de mesures rapportées sous différents formats entre les sources documentaires (Caldwell et coll. 2000; Marquart et coll. 2001). Les données d'expositions peuvent être présentes sous forme de mesures individuelles – une valeur associée à l'exposition d'un seul travailleur – ou en tant que paramètres de synthèse résumant l'exposition de plusieurs travailleurs. L'emploi de la moyenne et l'écart-type arithmétique ou géométrique, l'étendue, la médiane et les centiles pour rapporter la distribution des expositions diffère également selon les publications, et peut être un obstacle à leur analyse combinée. Caldwell et coll. (2000) ont notamment exclu de nombreux résultats d'exposition aux solvants pour hydrocarbures rapportés sous forme autre que la moyenne arithmétique dans leur analyse. Dans le cas de la présence simultanée de mesures individuelles et de résultats sous forme de paramètres de synthèse, Hein et coll. (2008; 2010) ont utilisé des modèles de régression pondérée pour évaluer l'exposition aux solvants chlorés et aux hydrocarbures dans le cadre d'études épidémiologiques de devis cas-témoins.

L'approche utilisée dans le cadre de ce travail est basée sur une méthode développée par Lavoué et coll. (2007) permettant de surmonter les difficultés liées à l'analyse de valeurs d'exposition rapportées sous différents formats dans la littérature par le traitement en deux étapes des données sous forme de paramètres de synthèse. La première étape consiste à uniformiser les paramètres de synthèse et concerne les résultats présentés sous une forme autre que la moyenne et l'écart-type géométrique (MG et ÉTG). Pour chacun de ces résultats, la MG et l'ÉTG sont estimés à partir des autres paramètres statistiques rapportés, par exemple la moyenne et l'écart-type arithmétique. Les équations permettant cette transformation sont basées sur les propriétés de la distribution log-normale, qui définit généralement le profil

d'exposition aux contaminants chimiques (Esmen et Hammad 1977; Leidel et coll. 1977). Les simulations réalisées par Lavoué et coll. ont montré que les différentes équations permettent d'estimer la MG et l'ÉTG avec un biais relativement faible. La seconde étape revient à recréer l'échantillon original pour chaque résultat sous forme de paramètres de synthèse par simulation Monte-Carlo, à partir de la MG, de l'ÉTG et de la taille d'échantillon rapportée dans la publication (Équation 1).

$$x = \exp (\ln(\text{GM}) + Z \times \ln(\text{GSD})) \quad (1)$$

Le paramètre Z de l'équation 1 correspond à un échantillon aléatoire de la distribution normale standard (moyenne de 0 et écart-type de 1). Chaque valeur simulée représente donc une exposition aléatoire générée à partir de la distribution définie par sa MG et ÉTG. Il est à noter que la procédure de simulation ne change pas les autres informations contextuelles associées aux résultats sous forme de paramètres de synthèse dans la banque de données. Par exemple, un résultat présentant une MG et ÉTG résumant 10 mesures d'exposition entraînera 10 valeurs simulées différentes, tout en conservant les mêmes informations pour les autres paramètres descriptifs. Les valeurs simulées sont ensuite combinées à celles associées à des mesures uniques, permettant l'application des méthodes d'analyses pour des ensembles de données constitués de mesures d'exposition uniques. Pour tenir compte de l'incertitude liée au caractère aléatoire de la méthode de Monte-Carlo, Lavoué et coll. (2007) ont répété cette procédure 1000 fois pour le calcul des moyennes géométriques, et 200 fois pour les paramètres de régression. La variabilité des estimations entre les répliques était relativement faible avec des écarts-types relatifs (ÉTR) se situant généralement entre 10% et 20%, malgré des proportions de valeurs simulées supérieures à 80% dans leurs banques de données. À la lumière de leurs résultats, les auteurs ont indiqué que des résultats similaires

quant à la variabilité due à la méthode de Monte-Carlo pourraient être obtenus avec un nombre plus faible de répétitions.

2.2.3. Présentation de l'approche d'inférence multimodèle

Les modèles de régression linéaire multivariée impliquent le choix de variables contextuelles potentiellement associées à la variable de réponse. Dans le contexte de l'hygiène industrielle, ces variables peuvent par exemple être basées sur diverses composantes du milieu de travail (p.ex. température ambiante, taille de l'entreprise, saison) et les tâches et procédés (Burstyn et Teschke 1999). Le développement des modèles empiriques se fait généralement par l'ajout ou le retrait des variables jusqu'à l'obtention d'un modèle final contenant seulement celles supposées avoir une influence sur la réponse. Le choix du modèle repose sur la comparaison de critères d'ajustement aux données (p.ex. coefficient de détermination, critère d'information d'Akaike ou de Schwarz), ou des tests d'hypothèses (Kutner et coll. 2005; Vittinghoff et coll. 2005). Par ailleurs, les variables absentes du modèle final sont considérées comme n'ayant aucun effet ou importance sur la réponse.

Cette approche a été remise en question par certains auteurs en raison de la « perte » de l'information potentiellement contenue dans les variables absentes du modèle et l'incertitude liée à la sélection de modèle qui n'est pas prise en compte (Buckland et coll. 1997; Raftery et coll. 1997; Augustin et coll. 2005; Hobbs et Hilborn 2006; Lavoué et Droz 2009). Burnham et Anderson (2002) proposent en contrepartie une méthode d'inférence multimodèle basée sur l'approche de la théorie de l'information, qui a été appliquée en hygiène du travail pour l'évaluation de l'exposition au formaldéhyde et à des composés organiques volatils (Lavoué et Droz 2009; Lavoué et coll. 2011). Celle-ci comprend la sélection d'un ensemble de modèles candidats plausibles contenant différentes combinaisons de variables qui peuvent expliquer la

variable de réponse. Les modèles candidats sont ensuite classés en fonction de leurs poids relatifs basés sur leur ajustement aux données selon un critère d'information.

Le poids relatif d'un modèle représente la probabilité qu'un modèle candidat donné soit celui qui explique le mieux la réponse en fonction des données récoltées, et était basé dans notre analyse sur le critère d'information d'Akaike corrigé pour les petits échantillons (AICc, équation 2) (Hurvich et Tsai 1989).

$$AICc = 2k - 2 \ln(\mathcal{L}) + \frac{2k(k + 1)}{n - k - 1} \quad (2)$$

Où k représente le nombre de paramètres du modèle, \mathcal{L} le logarithme du maximum de vraisemblance, et n la taille d'échantillon.

Ce critère est recommandé lorsque le ratio taille d'échantillon : nombre de paramètres est inférieur à 40 (Burnham et Anderson 2002), ce que les analyses préliminaires indiquaient. Les poids relatifs permettent aussi l'identification des variables prédictives ayant le plus d'influence sur la variable dépendante avec des ratios d'évidence calculés en divisant la somme des poids des modèles contenant la variable d'intérêt par la somme de poids des modèles où cette variable est absente. Ainsi, un ratio de 1 indique que la variable a autant de chance d'être un facteur important de l'exposition que de n'avoir aucune influence. Un ratio supérieur à 100 suggère que cette variable a un impact important sur la réponse, alors que la situation inverse se produit avec un ratio inférieur à 0.01 (Lukacs et coll. 2007). L'estimation des paramètres de régression et les prédictions sont pondérées en fonction de la valeur et du poids relatif pour chaque modèle. Dans le cas où une variable est absente d'un modèle, la valeur du paramètre correspondant dans celui-ci est nulle. L'estimation des paramètres pour une variable présente uniquement dans des modèles comportant de faibles poids relatifs va donc tendre vers 0, et aura un faible impact sur la valeur des prédictions – dans le cas de ce travail, sur les

concentrations en silice cristalline respirable. Ainsi, au lieu d'avoir une dichotomie « influence / aucune influence » pour une variable, l'approche multimodèle fournit un portrait plus nuancé, reflétant mieux l'incertitude associée à la sélection de modèle.

2.2.4. Sélection des variables

La sélection des variables pour la modélisation dans le cadre des deux analyses a impliqué au départ l'exclusion des paramètres de la banque de données qui n'étaient pas en rapport à la prédiction des niveaux d'exposition, par exemple les commentaires généraux, la limite de détection de la méthode d'analyse ou la taille d'échantillon associée à chaque résultat. Certaines variables n'ont également pas été considérées car elles étaient trop peu documentées dans la banque, notamment les paramètres associés à la protection respiratoire, la formation des travailleurs, la présence de source d'exposition secondaire à proximité et le contenu en silice du matériau. De plus, les échantillons contenus dans les deux sous-banques ont été analysés exclusivement par diffractométrie des rayons X ou spectrophotométrie infrarouge, deux méthodes donnant des résultats semblables (Maciejewska 2008), et les variables de nature analytique n'ont pas été retenues. L'inclusion de la variable relative à l'instrument d'échantillonnage a également été considérée, mais celle-ci était fortement associée à d'autres catégories de déterminants et a donc été exclue. Par contre, bien que la conception et les débits recommandés pour les différents types de cyclones peuvent différer, les variétés présentes dans les deux sous-banques échantillonnent la fraction respirable telle que définie par l'ACGIH, le Comité Européen de Normalisation et l'Organisation Internationale de Normalisation (Görner et coll. 2001; Lippmann 2001; Vincent 2007; Lee et coll. 2010) et peuvent donc être considérés comme équivalents (Ratney 2000). D'ailleurs, la variable de l'instrument d'échantillonnage n'était pas incluse dans les modèles d'exposition à la silice

cristalline respirable développés par Flanagan et coll. (2006) et Peters et coll. (2011b) car non-significative.

Dans le cas de l'analyse en fonction de la tâche exécutée, les variables relatives à l'outil et au matériau étaient fortement associées aux catégories de tâches et ont donc été exclues de la modélisation en raison des problèmes potentiels de colinéarité. Par contre, les catégories de cassage et de perçage de pièces de maçonnerie étaient associées à une variété d'outils et de matériaux, permettant leur analyse séparée. La tâche de cassage de pièces de maçonnerie a donc été divisée en trois sous-catégories en fonction de l'outil, alors que la catégorie de perçage de pièces de maçonnerie a été séparée selon les trois matériaux associés. De plus, certaines catégories de titres d'emploi et de tâches n'étaient associées qu'à un faible nombre de mesures dans les sous-banques respectives, et ont donc fait l'objet de regroupements. Dans le cas de l'analyse des titres d'emploi, 10 mesures concernant les charpentiers-menuisiers, carreleurs et opérateur d'usines fixes ou mobiles ont été ajoutées aux 47 mesures de la catégorie « autre » présentes dans la banque Métiers. Pour les tâches, des nouvelles catégories ont été créées pour regrouper certaines opérations ayant trait à l'excavation, aux fondations, aux travaux routiers et à la maçonnerie, pour obtenir une taille d'échantillon par catégorie supérieure à 10 et des résultats provenant d'au moins 2 sources documentaires.

Les ensembles de modèles candidats ont été élaborés en utilisant toutes les combinaisons présence/absence des variables présentées dans le Tableau 2.2. Par contre, puisque l'objectif de ce travail visait l'évaluation de l'exposition en fonction du titre d'emploi et des tâches exécutées, ces deux variables ont été incluses dans tous les modèles candidats dans leurs analyses respectives. La durée d'échantillonnage (en minutes) a fait l'objet d'une

transformation logarithmique, alors que la variable de l'année a été normalisée en soustrayant l'année la plus ancienne dans chaque sous-banque.

Tableau 2.2: Variables incluses dans les ensembles de modèles

Variable	Type	Analyse	
		Métiers	Tâches
Durée (ln(min))	C ^A	X	X
Année d'échantillonnage	C	X	X
Titre d'emploi	N ^B	X ^C	
Tâche exécutée	N		X ^C
Secteur d'activité	N	X	X
Type de projet	N	X	X
Stratégie d'échantillonnage	N	X	
Environnement	N	X	X
Maitrise (utilisation)	N	X	
Maitrise (type)	N		X ^C
Ventilation (dilution)	N		X

^A Variable numérique continue

^B Variable nominale

^C Variable présente dans tous les modèles candidats de l'ensemble de modèles

Dans le cas de l'analyse des niveaux d'exposition en fonction du titre d'emploi sur un quart de travail, trois interactions ont également été ajoutées dans certains modèles candidats de l'ensemble, dont deux concernant la stratégie d'échantillonnage. Ces deux interactions permettaient de tenir compte d'effets potentiellement différents pour la durée d'échantillonnage et l'année de l'évaluation, selon un objectif de conformité réglementaire (inspection), ou dans une optique de surveillance sans portée légale immédiate. L'autre interaction ajoutée visait à évaluer l'effet de l'utilisation ou non d'un moyen de maîtrise lors de travaux effectués soit à l'extérieur ou à l'intérieur. Le type de moyen de maîtrise n'a pas été considéré puisque ce paramètre n'était pas rapporté pour une proportion importante des mesures. Il est à noter que les deux variables d'une interaction doivent être présentes dans

une modèle candidat pour permettre son inclusion. L'ensemble pour l'analyse en fonction du titre d'emploi comportait au total 260 modèles candidats, dont 132 avec au moins une interaction. Le modèle le plus étoffé de l'ensemble comprenait donc les 8 variables présentées au Tableau 2.2 et les 3 interactions, alors que le plus parcimonieux ne contenait que la variable du titre d'emploi.

Dans le cas de l'exposition selon les tâches, la variable du type de moyen de maîtrise (p.ex. ventilation locale, arrosage de la surface de travail) a été incluse dans tous les modèles candidats, au même titre que la variable tâche. L'inclusion de cette variable visait à estimer l'influence directe des différents moyens de maîtrise de l'exposition, sans pondérer avec des modèles qui excluraient cette variable. Les moyens de maîtrise étaient saisis dans la banque de données sous forme de colonne distincte pour chaque type selon leur présence ou absence pour chaque mesure d'exposition. Certaines données étaient également associées à l'utilisation simultanée de plus d'un type de moyen de maîtrise, par exemple l'arrosage de la surface et l'aspiration à la source, qui sont rapportés comme présents dans les deux colonnes respectives de la BDEP. Afin de simplifier l'analyse, la variable du type de moyen de maîtrise à la source a donc été créée en agrégeant les résultats pour les cinq colonnes correspondantes en une seule. La saisie de la ventilation générale par dilution dans la banque de donnée est également sous la forme de présence/absence, et intègre la présence de conditions venteuses. Une interaction entre l'environnement et la ventilation a ainsi été intégrée à un sous-groupe de l'ensemble de modèles pour tenir compte de la présence de ventilation générale à l'extérieur (vent), comparativement à l'intérieur (ventilation mécanique). Au final, l'ensemble englobait 80 modèles candidats (16 avec l'interaction), dont le plus parcimonieux contenait seulement les variables de tâche et de type de moyen de maîtrise.

2.2.5. Définition des indices d'exposition relatifs et scénarios de prédictions

Afin de simplifier l'interprétation des coefficients de régression quant à l'effet des différents déterminants de l'exposition, ceux-ci sont présentés sous la forme d'Indices relatifs d'exposition (RIE) (Lavoué et coll. 2005). Pour une variable nominale donnée, le RIE de la catégorie de référence est de 100 %; une catégorie avec un RIE inférieur à 100 % est associée à des niveaux d'exposition réduits et vice-versa. Prenons par exemple l'utilisation ou non de moyens de maîtrise, dont la catégorie de référence est « non » (RIE de 100%). Un RIE de 25% pour la catégorie « oui » indiquerait donc que l'utilisation d'un moyen de contrôle des poussières à la source est associée à une réduction de 75% des niveaux d'exposition comparativement à la catégorie de référence.

L'estimation des niveaux d'exposition en fonction du titre d'emploi pour un quart de travail et des tâches exécutées a été réalisée à partir de scénarios de prédictions prédéfinis. Dans le cas de l'analyse en fonction du titre d'emploi, le scénario a été élaboré sur la base de l'exposition pour une durée de 8 heures afin de pouvoir comparer les résultats aux valeurs limites en vigueur. Par contre, puisque la durée d'exécution des différentes opérations est variable, la durée médiane d'échantillonnage pour chaque catégorie a été intégrée dans le scénario de prédiction pour l'analyse des tâches. De plus, certaines tâches, par exemple celles de nature manuelle, ne sont pas compatibles avec des moyens techniques de maîtrise de l'exposition; les prédictions ont donc été établies en tenant compte seulement de l'effet de l'absence de ces dispositifs. Pour les deux analyses, les scénarios ont été élaborés en supposant une distribution équivalente des autres déterminants à l'exception de l'effet des catégories où la documentation du déterminant était absente. Par exemple, pour la variable de l'environnement, les prédictions impliquent que 50% du travail est effectué à l'extérieur et 50% à l'intérieur, et 0% pour l'effet de la catégorie « inconnue ». Les scénarios développés visaient

à estimer l'exposition de façon générale en considérant toutes les conditions représentées dans les sous-banques, mais il est possible de créer des scénarios plus spécifiques pour les tâches ou métiers en fonction des caractéristiques d'un milieu de travail donné à partir des paramètres de régression.

2.2.6. Traitement des valeurs d'exposition non-détectées

Les analyses préliminaires des deux sous-banques ont montré la présence d'un nombre non négligeable de valeurs rapportées sous la limite de détection ou « non détectées », en particulier dans l'analyse en fonction du titre d'emploi. L'approche la plus courante dans le domaine de l'hygiène du travail consiste à substituer ces valeurs par une autre, par exemple en divisant la valeur rapportée par 2 ou la racine carrée de 2, dans le calcul des statistiques descriptives (Hornung et Reed 1990).

Dans le cadre de ce travail, des méthodes considérées plus valides ont été utilisées pour le calcul des statistiques descriptives et la modélisation. Pour les statistiques descriptives, les MGs et ÉTGs pour chaque catégorie des variables nominales recensées au Tableau 2.2 ont été calculées par régression robuste sur les statistiques d'ordre (*robust Regression on Order Statics*, ou ROS) (Helsel 2005). Cette approche consiste à ajuster une distribution normale aux valeurs observées après une transformation logarithmique pour ensuite modéliser les valeurs non détectées. Le calcul des statistiques descriptives s'effectue par la suite sur l'ensemble des données observées et modélisées. Pour la modélisation, des modèles de régression censurée Tobit (Tobin 1958; Helsel 2005) ont été utilisés pour tenir compte des valeurs non détectées dans l'estimation des effets des déterminants ainsi que dans les prédictions en fonction des titres d'emploi et des tâches exécutées. En l'absence de consensus sur le paramètre approprié permettant de déterminer la proportion de la variance expliquée par les modèles Tobit

(Choodari-Oskooei et coll. 2011), le coefficient de détermination (R^2) a été estimé par des modèles linéaires avec le modèle contenant l'ensemble des variables et la substitution des valeurs non détectées en les divisant par 2 (Hornung et Reed 1990).

Pour les deux analyses, les statistiques descriptives ont été calculées pour les 100 réplifications de chaque sous-banque; les valeurs rapportées sont la médiane des MGs et ÉTGs, alors que la variation dans les estimations due à la simulation Monte-Carlo a été évaluée par l'écart-type relatif (ÉTR). Quant à la modélisation, celle-ci a été appliquée à 20 répliques des deux sous-banques et la moyenne des coefficients a été utilisée comme estimation, en plus d'évaluer leurs variations avec les ÉTRs.

Les analyses ont été effectuées avec le logiciel R, version 2.12 pour l'analyse des métiers, et version 2.14.0 pour l'analyse des tâches (R Development Core Team 2011). De plus, les modules complémentaires (« packages ») NADA (Lee 2010) et survival (Therneau et Lumley 2011) ont été utilisés pour le calcul des statistiques descriptives avec ROS et l'ajustement des modèles Tobit, respectivement.

2.3. Contribution des auteurs

Ma participation à ce projet comprend la réalisation des analyses, soit la sélection et la préparation des données, l'élaboration et la mise en œuvre des approches de modélisation, en plus de l'interprétation des résultats. J'ai également écrit la majeure partie des deux manuscrits, avec la contribution de Jérôme Lavoué et Michel Gérin pour la révision et les éléments de discussion, en particulier quant à la surexposition des travailleurs et les limites liées à l'utilisation de sources de données préexistantes. Ces derniers ont également joué un rôle important dans la conception du protocole et l'encadrement de la recherche tout au long de ma maîtrise.

Charles Beaudry, Denis Bégin et Chantal Dion, à l'instar de MM. Lavoué et Gérin, forment l'équipe responsable de la création de la banque de données d'exposition à la silice qui est le point de départ de ce travail. L'expertise de C. Beaudry a aussi été mise à contribution pour la préparation des données, notamment le regroupement des catégories de déterminants et tâches similaires pour les analyses, et à l'interprétation des résultats.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SUR UN QUART DE TRAVAIL EN FONCTION DU TITRE D'EMPLOI

Article en préparation pour *Annals of Occupational Hygiene*

Statistical modeling of crystalline silica exposure by trade in the construction industry using a database compiled from the literature

Jean-François Sauvé¹, Charles Beaudry¹, Denis Bégin¹, Chantal Dion², Michel Gérin¹ and Jérôme Lavoué¹

¹Department of Environmental and Occupational Health, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada.

²Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du Travail, Montréal, Québec, Canada.

Keywords: construction, silica, occupational exposure, multi-model inference

3.1. Abstract

A quantitative determinants-of-exposure analysis of respirable crystalline silica (RCS) levels in the construction industry was performed using a database compiled from an extensive literature review. Statistical models were developed to predict work-shift exposure levels by trade. Monte Carlo simulation was used to recreate exposures derived from summarized measurements which were combined with single measurements for analysis. Modeling was performed using Tobit models within a multimodel inference framework, with year, sampling duration, type of environment, project purpose, worksite type and sampling objective as potential predictors.

1346 RCS measurements were included in the analysis, of which 318 were non-detects and 228 were simulated from summary statistics. The model containing all the variables explained 22% of total variability. Apart from trade, sampling duration, year and strategy were the most influential predictors of quartz levels. The use of exposure controls was associated with a 21% decrease in exposure levels compared to none, and increased concentrations were found for industrial, demolition and renovation projects. Predicted geometric means for year 1999 were the highest for drillers (0.213 mg/m^3) and underground workers (0.191 mg/m^3), while the estimated exceedance fraction of the ACGIH TLV for all trades ranged from 46% to 88%.

The predicted geometric means in this study indicated important overexposure compared to the TLV. However, the low proportion of variability explained by the model suggests that the construction trade is not a good indicator of work-shift exposure levels. The impact of the different tasks performed during a work shift needs to be assessed to manage and control exposure levels.

3.2. Introduction

Chronic occupational exposure to respirable dust containing crystalline silica has been linked to respiratory diseases such as lung cancer and silicosis (IARC, 1997; Sirajuddin and Kanne, 2009). Due to its ubiquitous presence in many industries, silica exposure is one the most studied occupational exposures to a carcinogen (Kauppinen *et al.*, 2000) and has played an important role in the development of occupational hygiene (Brown, 1965).

Silica is a major constituent of building materials such as concrete, cement and mortar (NIOSH, 2002), and tasks ranging from sawing or grinding these materials to construction site cleaning can put workers at risk of breathing silica-containing dust (IARC, 1997). Consequently, frequent overexposures to respirable silica in the construction sector have been reported by several studies, notably in Rappaport *et al.* (2003) and Flanagan *et al.* (2006). Furthermore, the construction industry was reported more often than any other industry in the United States on the death certificates of workers diagnosed with silicosis between 1990 and 1999 (NIOSH, 2008). Similar findings were reported by Mazurek and Attfield (2008) for silicosis deaths in adults less than 45 years of age, for the 1968–2004 period.

The wide variability in exposure levels in the construction industry, including between and within workers, complicates the assessment of health risks and compliance with occupational exposure limits. Work sites are typically temporary and silica exposures are highly dependent on the tasks and materials used (Chisholm, 1999; Lumens and Spee, 2001; Tjoe Nij *et al.*, 2004). The important variability in exposure levels on construction sites means that a full, quantitative exposure surveillance program would require considerable resources while still being potentially incomplete (Flanagan *et al.*, 2006).

In this context, existing sources of exposure data can be used to gather information on the determinants and associated exposure levels in a multitude of circumstances. These include scientific literature (Stewart and Rice, 1990), survey reports and occupational exposure databases such as the U.S Integrated Management Information System (IMIS) (Gómez and Rawls, 1995).

The analysis of exposure data sourced from the literature presents several challenges, such as the lack of standardization between sources on the types of determinants of exposure (Tielemans *et al.*, 2002) and measurements reported (e.g. single measurements, arithmetic and geometric mean, range, etc) (Caldwell *et al.*, 2001; Gold *et al.*, 2008). Weighted arithmetic mean (Caldwell *et al.*, 2001) and weighted regression (Hein *et al.*, 2008) have been used to analyze single and summarized measurements simultaneously. Alternatively, Lavoué *et al.* (2007) used Monte Carlo methods to simulate individual exposures derived from the summary statistics and sample size reported, and combined them with the single measurements for descriptive statistics and modeling.

An occupational exposure database (OEDB) of silica exposure in the construction industry was compiled from an extensive literature review to document exposures and improve preventive measures in the province of Quebec (Canada) (Beaudry *et al.*, 2011). The database contains measurements of quartz, cristobalite, tridymite and dust of various fractions (e.g. respirable, thoracic, total) sampled under different strategies such as compliance assessment, task-based or other work-shift evaluation.

The present analysis aimed to investigate the extent to which the construction trades or occupational titles are predictive of respirable crystalline silica work shift exposure, as well as to quantify the effects of other exposure determinants from the recently built database. To this

end, a subset of the database containing samples representative of work shift exposure was used to develop empirical statistical models under a multimodel averaging framework.

3.3. Materials and methods

3.3.1. Database preparation

The exposure database was compiled from an extensive literature review of exposure data pertaining to the construction industry and published between 1987 and 2009. Data sources included scholarly articles and reports from research institutes, as well as the ACGIH construction committee (Becker *et al.*, 2001; Flanagan *et al.*, 2006) and the French *Institut de Veille Sanitaire* (InVS, 2008) databases. The database contains over 6000 results from 116 sources, representing 11637 individual measurements, and includes several pollutants such as quartz, cristobalite and dust. Each measurement is associated with descriptions of the determinants of exposure (such as trade, work environment, construction sector, tasks, and materials), sampling strategy and methodology, as well as descriptions of the use and type of exposure controls and personal protective equipment (Beaudry *et al.*, 2011).

For this study, the dataset was restricted to samples identified as respirable quartz or respirable crystalline silica, and also excluded data collected under task-based and worst-case sampling strategies. Thus, the exposure measurements remaining in the dataset were those sampled in order to compare the results with workplace exposure limits, and deemed representative of work shift exposure. A distinction was made between the exposure data collected during inspections assessing legal compliance, and other strategies such as research or routine monitoring. Further restrictions involved the exclusion of exposure data sampled with direct-reading instruments and outside the workers' breathing zone. Entries with no

duration recorded were also excluded from the dataset, and data where part-time samples were used to assess work-shift exposure were converted to a single TWA for each individual. When sampling year was entered as a range (e.g. 1990–1992), the median was used in the analysis and, if no sampling year was entered, publication year of the source was used as a surrogate. Both the sampling year and duration were treated as continuous variables in our analysis.

Measurements with the trade description missing (N=85) were excluded, as most of the descriptions of their associated determinants were also missing, while trade categories with less than 10 measurements were combined in a new category labeled “Other”. Other potential exposure determinants were included in our analysis when more than a third of their entries were documented in the database, and are detailed in Table 3.1. Due to the small number of observations in “closed” and “restricted” workspaces, these were combined in a new category labeled “indoor”. Similarly, measurements in “industrial” and “commercial” construction sectors were merged in the new category “Industrial and Commercial”.

3.3.2. Summarized exposure levels

In this analysis exposure levels reported as summary statistical parameters (SS) (e.g. median, arithmetic and geometric mean) of exposure measurements were processed as described in Lavoué *et al.* (2007). First, each set of summary parameters was converted into a GM and a GSD, thus defining a lognormal distribution. The log-transformed GMs and GSD were then used to simulate individual exposures using equation 1, where Z is a random value from the standard normal distribution N(0,1) (Hewett, 2005).

$$x = \exp (\ln(\text{GM}) + Z \times \ln(\text{GSD})) \quad (1)$$

For each SS result, the number of measurements simulated was equal to the reported sample size – e.g. a GM and GSD linked to a sample size of 10 would result in 10 simulated individual exposure values – with their associated determinants and other information being identical. The simulated data was then combined with the single measurements prior to their analysis. This procedure was repeated 100 times, thus creating 100 replicates of the database with identical single measurements and different values for the data generated from summary parameters due to the random simulation procedure.

3.3.3. Descriptive statistics

For each categorical determinant (as listed in Table 3.1), we calculated GMs and GSDs using Robust Regression on Order Statistics (ROS) (Helsel, 2005) to account for the measurements reported as under the limit of detection (LOD). Recently applied by Gaffney *et al.* (2011) for the analysis of occupational exposures to benzene, this method was used to obtain estimates of the mean in the presence of multiple LODs, and consists in fitting a linear regression between the logged detected values and theoretical quantiles of the assumed distribution.

The GMs and GSDs for each value of the categorical determinants were computed for the 100 replicates of the dataset. The median of the 100 GM and GSD values for each strata of each determinant were used as the exposure metric, while the variability of these estimates for the simulation was assessed by computing their relative standard deviation (RSD).

3.3.4. Statistical modeling

The modeling of the exposure levels and associated variables was done using a multi-model averaging framework (Burnham and Anderson, 2002), which has been applied recently

to occupational exposures (Lavoué and Droz, 2009; Lavoué *et al.*, 2011). Unlike stepwise regression where variables are added or removed until a single final model is selected, multimodel inference involves an *a priori* set of hypotheses or models from which formal inference is drawn. This procedure does not assume that only a single model is useful, and takes into account model selection uncertainty (Lukacs *et al.*, 2007; Anderson, 2008). Within this framework effect estimates and predictions are averaged across all models with weights based on their goodness of fit to the data.

The model set was constructed by including all possible combinations of the variables listed in Table 3.1. Since the objective was to investigate exposure levels by trade, the trade variable was included in every model, thus resulting in a preliminary list of 128 models. We also included interactions of sampling duration with strategy, and sampling year with strategy, to assess different behaviors of the sampling duration and time trends for compliance vs. other strategies. Another interaction tested was the use of control methods with workspace, to investigate the effect of the use of engineering controls in indoor and outdoor environments.

The final model set consisted of a list of 260 models. Further processing of the variables included normalization of the sampling year by subtracting the earliest year in the dataset (1991), and log-transformation of the sampling duration.

The criterion used in the modeling procedure was a modified Akaike Information criterion with a second-order correction (AICc, equation 2), which converges with AIC as the sample size increases (Hurvich and Tsai, 1989).

$$\text{AICc} = 2k - 2 \ln(\mathcal{L}) + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (2)$$

Where k = number of model parameters, \mathcal{L} = maximum likelihood (log), n = sample size

The AICc values for each model were used to compute model probabilities or “Akaike” weights, which add up to one across the model set, and can be seen as the probability of a candidate model being the best approximating model, given the model set and the data. The relative importance of the predictor variables was assessed by computing their evidence ratios (equation 3), which is the quotient of the cumulative weight of the models containing the variable of interest over the cumulative weights of the models without the variable.

$$ER_j = \frac{\sum w_+(j)}{\sum w_-(j)} \quad (3)$$

Evidence ratios of 100 and more indicate strong support while ratios between 0.01–100 suggest limited to moderate support for the variable (Lukacs *et al.*, 2007). On the other hand, an evidence ratio below 0.01 indicates that the variable has negligible importance on the response variable.

The Akaike weights were used to compute estimates of the effects of the different variables by averaging the coefficients over the whole model set, with a value of 0 taken for the models without the variable.

The statistical procedure used to fit the models to the data was Tobit (or censored regression) analysis (Lubin *et al.*, 2004) to account for measurements reported as lower than the LOD, using the *survreg* function in R. An exception to this procedure, proportion of variability explained by the full model was calculated as the coefficient of determination (R^2) of a model containing all the variables and interactions fitted to the data with non-detects replaced by LOD/2 (Hornung and Reed, 1990). The use of substituted non-detects for the coefficient of determination was due to the lack of consensus on the measure of explained variation in survival modeling (Choodari-Oskoei *et al.*, 2011).

The modeling procedure was applied to a subset of 20 replicates of the dataset. For each replication, the averaged model parameters, model weights and R^2 were computed. The mean value of the model parameters from the 20 replications and their RSDs were computed to assess the variability of these estimates.

The mean coefficients averaged over the model set and replicates were used to compute Relative indices of exposure (RIE, equation 4) (Lavoué *et al.*, 2006) in order to illustrate the quantitative influence of nominal variables on exposure levels. For each variable, the level with the largest sample size was selected as the reference (except levels labeled as “unreported”), with the RIEs for the other levels of the category representing the estimated effect size by percentage compared to the reference level set as 100%.

$$RIE_{levelA}(\%) = 100 * \exp(Coeff_{levelA} - Coeff_{levelREF}) \quad (4)$$

Where RIE_{levelA} is the RIE of level A, and $Coeff_{levelA}$ the coefficient of level A for a given variable, while $Coeff_{levelREF}$ is the coefficient for the reference level of the same variable. When the reference level is included in the intercept, its coefficient value in equation 4 is taken as 0.

The averaged model coefficients were also used to obtain predictions of exposures by trade. The chosen exposure scenario used the median sampling year of the dataset (1999) and a duration of 480 minutes. The other determinants were given an equal distribution across their respective levels, for instance 50% of the work performed indoors and 50% outdoors, or 50% of compliance assessment and 50% of other strategies, with the exclusion of the levels labeled as “unreported”. The two exceptions were for underground workers, which were considered as working exclusively in an interior environment, while drillers and roofers were considered only in an exterior environment, as they were so in the dataset.

An iterative process similar to the modeling procedure was used for predictions, where the averaged predicted GM by trade was calculated across the 260 models (weighted by Akaike weights), and the mean value of the 20 replicates was used as the final estimate along with the RSD to assess the variation between iterations.

The predictions were also used to investigate the fraction of exposures (Θ) expected to exceed a chosen occupational exposure limit (OEL). This was done by using the predicted GMs in equation 5 with two different OEL values of 0.025 and 0.1 mg/m³, the ACGIH TLV and Quebec legal OEL respectively.

$$\Theta = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(\text{OEL}) - \ln(\text{GM})}{\ln(\text{GSD})} \right] \quad (5)$$

As no trade-specific residual variance structure was modeled, the residual standard error (σ) was computed for each of the 260 models. For each iteration, the value of σ averaged across the model set was calculated, and the exponent of the mean value from these 20 iterations was used as the GSD in equation 5.

All analyses were performed using the R 2.12 statistical software (R Development Core Team, Vienna, Austria), with the packages NADA for the ROS function (Lee, 2010) and survival for Tobit modeling (Therneau and Lumley, 2010).

3.4. Results

3.4.1. Descriptive statistics

Of the 11637 measurements contained in the database, 4677 were identified as being respirable crystalline silica samples (excluding cristobalite). The restriction to personal samples yielded 4181 measurements, of which 1923 were collected under compliance assessment or

other strategies to evaluate time-weighted average exposure. Further restrictions on the basis of sampling methodology and missing trade descriptions and sampling duration resulted in a dataset containing 1404 measurements. 85 part-time measurements were flagged as part of single evaluations and were combined in 35 time-weighted averaged values. The dataset contained 12 measurements for the steamfitter trade which were all reported as under the LOD and removed from further analysis as they would lead to unreliable summary statistics and affect the modeling (Helsel, 2005). The final dataset thus comprised 1346 measurements, of which 318 (23.6%) were left-censored and 228 (16.4%) reported as summary statistics (SS). The median sampling year was 1999 (range 1991–2006) and median sampling duration was 336 minutes (interquartile interval 175–480 min). All trades had measurements collected under both compliance and other strategies with the exception of foremen, roofers and drillers where none came from compliance assessment. The exposure data originated from 33 sources of data, with 631 measurements (48%) from the ACGIH database of Flanagan *et al.* (2006). These measurements were all included in the compliance assessment strategy category. The sources for the remaining 52% of the dataset were split evenly between peer-reviewed articles, NIOSH reports and other public organization reports.

The sample sizes, GMs, GSDs, RSDs, proportion of non-detects and measurements originating from summary statistics for each categorical determinant are presented in Table 3.1. The total median GM was 0.084 mg/m³ with a GSD of 6.0. Underground workers had the highest median GM of quartz exposure with 0.257 mg/m³, followed by drillers, roofers, cement grinders/finishers bricklayers and pipeline laborers with values above 0.1 mg/m³. For the latter category, 49 of the 58 measurements involved abrasive blasting, with a GM of 0.132 mg/m³, compared to 0.032 mg/m³ for the remaining 9 measurements. The GSDs for trades ranged from 1.9 (foreman) to 7 (cement grinder/finisher).

The median GM for compliance assessment (0.113 mg/m^3) was almost twice the median GM for the other strategies (0.066 mg/m^3) but with 33% of non-detects, compared to 15% for the latter. The use of any control method (0.062 mg/m^3) had a median GM lower than both “none” (0.082 mg/m^3) and “Unreported” (0.094 mg/m^3). Other categories (excluding “unreported”) with quartz GMs above 0.1 mg/m^3 include Residential (0.125 mg/m^3) and Industrial/Commercial (0.104 mg/m^3) sectors, as well as Indoor workspace (0.147 mg/m^3).

RSDs of the geometric means across the 100 replicated datasets varied from 1% to 3% with the exception of three categories: underground workers (7%), foremen (6%) and cement finishers (4%).

Table 3.1: Descriptive statistics of the dataset

Total	N	GM^A (mg/m³)	GSD^B	ND^C (%)	SS^D (%)
	1346	0.084	6.0	23.6	16.9
Trade					
Underground worker	37	0.257	5.9	8.1	32.4
Driller	12	0.211	3.4	8.3	0
Grinder/Cement finisher	146	0.153	7.0	15.8	24.0
Roofer	53	0.150	2.4	0	0
Bricklayer	234	0.132	6.9	20.5	21.8
Pipeline laborer	58	0.101	4.7	29.3	0
Semiskilled worker	357	0.074	4.5	23.2	17.4
Laborer	226	0.064	6.9	27.9	21.2
Other	57	0.052	4.3	59.6	0
Heavy equipment operator	153	0.045	3.6	29.4	7.8
Foreman	13	0.042	1.9	7.7	61.5
Construction sector					
Residential	82	0.125	2.7	0	3.7
Industrial and Commercial	175	0.104	6.4	23.4	0
Unreported	721	0.101	6.5	26.6	25.4
Civil engineering & Roadwork	368	0.054	4.5	23.1	11.4
Project Type					
Unreported	875	0.106	6.0	24.9	20.9
Demolition	115	0.095	3.3	0.9	23.5
New construction	105	0.058	6.2	26.7	2.9
Renovation	251	0.046	5.5	28.3	6.0
Sampling strategy					
Compliance	644	0.113	8.2	33.2	0
Other	702	0.066	3.8	14.8	32.5
Workspace					
Interior	77	0.147	3.5	2.6	15.6
Unreported	818	0.103	6.4	26.3	22.4
Open/Exterior	451	0.057	4.9	22.4	7.3
Use of engineering controls					
Unreported	837	0.094	6.8	26.6	21.9
No	267	0.082	4.5	16.1	12.0
Yes	242	0.062	4.4	21.5	5.4

^A Median value of the geometric mean with Regression on Order Statistics from the 100 iterations

^B Median value of the geometric standard deviation with Regression on Order Statistics from the 100 iterations

^C Percentage of values reported as under the limit of detection

^D Percentage of values originating from summary statistics

3.4.2. Statistical modeling

The mean proportion of the variability explained by the model containing all the variables and interactions – with non-detects substituted by LOD/2 – was 21.6% (range 20.7%–22.4% across 20 replicates). Table 3.2 presents the structure of the five “best” models according to their individual weights. The combined weight for these 5 models was 0.69, which can be interpreted as the fact that 69% of the value of each averaged model coefficient was based on its value in these 5 models.

Table 3.2: Structure and weights of the 5 best models

Variable	Model rank				
	1	2	3	4	5
Trade	X ^A	X	X	X	X
ln(sample duration (min))	X	X	X	X	X
Sample year (-1991)	X	X	X	X	X
Project Type	X	X	X	X	X
Construction sector	X	X	X	X	X
Sampling strategy	X	X	X	X	X
Workspace				X	
Use of engineering control	X	X		X	
Sample Duration : Objective		X			X
Sample Year : Objective	X	X	X	X	X
Workspace : Control methods					
Model weights^B	0.24	0.17	0.14	0.08	0.06

^A Denotes a variable present in model

^B Mean model weights across the 20 iterations

Averaged model coefficients and RSDs across the 20 iterations are presented in Table 3.3. RSDs of the model coefficients ranged from 1% (Driller trade) to 74% (Unreported use of control methods), with a median value of 6%.

Table 3.3: Coefficients from the multimodel inference procedure, averaged over 20 iterations

	In Quartz (mg/m ³)				In Quartz (mg/m ³)		
	β^A	SE ^A	RSD (%) ^B		β^A	SE ^A	RSD (%) ^B
Intercept	-1.04	1.06	8				
Sample duration (Ln(min))	-0.44	0.16	3				
Sample year (-1991)	0.07	0.04	3				
Trade							
Underground worker	1.22	0.36	5				
Driller	1.77	0.5	1				
Grinder/Cement finisher	0.83	0.17	5				
Roofer	0.95	0.79	6				
Bricklayer	0.54	0.15	2				
Pipeline laborer	0.04	0.24	18				
Semiskilled worker	Reference						
Laborer	-0.06	0.16	22				
Other	-0.96	0.27	1				
Heavy equipment operator	-0.29	0.19	5				
Foreman	-0.16	0.46	47				
Construction sector							
Residential	0.43	0.37	6				
Industrial and Commercial	0.62	0.26	2				
Unreported	0.62	0.26	2				
Civil engineering & Roadwork	Reference						
Project Type							
Unreported	-0.60	0.64	5				
Demolition	0.15	0.25	18				
New construction	-0.63	0.30	2				
Renovation	Reference						
				Sampling strategy			
				Compliance	1.79	1.11	4
				Other	Reference		
				Workspace			
				Unreported	0.35	0.69	16
				Open/Exterior	Reference		
				Enclosed/Indoors	0.14	0.30	8
				Use of engineering controls			
				Unreported	-0.02	0.31	74
				No	Reference		
				Yes	-0.20	0.19	12
				Sample Duration : Strategy			
				In(Duration) : Compliance	0.09	0.17	14
				Sample Year : Strategy			
				Year(-1991) : Compliance	-0.26	0.05	1
				Workspace : Control methods			
				Interior : With controls	0.19	0.71	50
				Interior : Unreported	0.05	0.47	9
				Unreported : With controls	-0.18	0.64	14
				Both unreported	-0.03	0.46	36

^A Average values across the 20 iterations

^B Relative standard deviations of the model coefficients over the 20 iterations

3.4.3. Determinants of exposure

Sampling duration, year and objective were the most important predictors of quartz exposure levels with mean evidence ratios above 10^4 . On the other hand, construction sector and project type, both with an evidence ratio of 14 had a moderate influence on exposure levels. Finally, the evidence ratios for the use of control methods and workspace variables were 2 and 0.57 respectively, indicating a lack evidence for or against an actual association with exposure levels.

An increase of 50% of the sampling duration was associated with a decrease of 13% (95% approximate confidence interval CI 6–20%) and 16% (95% CI 5–26%) in exposure levels for the compliance and other sampling strategies respectively. Different temporal trends were found between the two sampling strategies with a yearly decrease of 17% (95% CI 11–22%) for compliance data, in contrast to an increase of 7% per year for the other evaluation strategies (95% CI 0–15%).

Table 3.4: Relative indices of exposure of the different project types and construction sectors

Project type	RIE (%) (95%CI)
Renovation	Reference ^A
New construction	53 (30–95)
Demolition	116 (71–190)
Construction sector	RIE (%) (95%CI)
Civil Engineering & Roadwork	Reference ^A
Industrial & Commercial	187 (112–311)
Residential	154 (74–320)

^A RIE of the reference level taken as 100%

RIEs for the construction sectors and project types are presented in Table 3.4, while Table 3.5 shows the RIEs for the combined effect of the use of control methods by workspace.

Renovation projects, industrial/commercial and residential sectors were associated with a noted increase in exposure levels compared to other reported categories. The reduction in exposure levels associated with the use of control methods was 18% in exterior settings and 21% indoors compared to uncontrolled exposure.

Table 3.5: Relative indices of exposure of the use of control methods by workspace

Use of control method	Workspace	
	Exterior RIE (%) (95%CI)	Interior RIE (%) (95%CI)
With control	82 (56–119)	91 (51–164)
Without control	Reference ^A	115 (64–206)

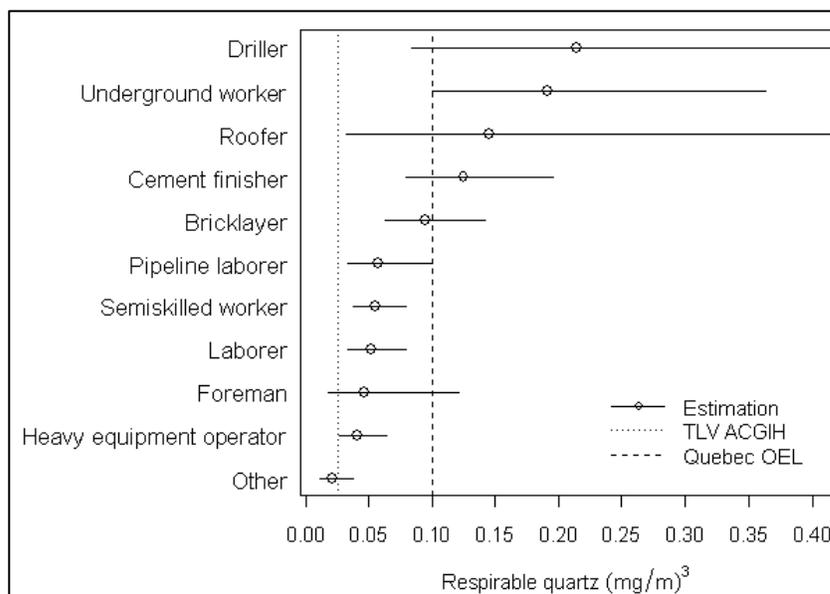
^A RIE of the reference level taken as 100%

3.4.4. Predicted exposures for trades

Figure 3.1 presents the predicted GM exposures by trade and associated 95% confidence approximate intervals for the selected exposure scenario. The driller, underground worker, roofer and cement grinder/finisher trades had mean quartz exposures above 0.1 mg/m^3 , with bricklayers following with 0.95 mg/m^3 . RSDs of the predictions ranged between 1–3%, with the exception of foremen (9%), roofers (8%) and underground workers (7%).

Estimated probabilities of overexposure by trade in Table 3.6, using a GSD of 6.3 based on the mean residual standard error of the regression, ranged from 46% to 88% for the 0.025 mg/m^3 TLV. The four trades with a predicted GM over the OEL of 0.1 mg/m^3 had estimated exceedance fractions over 50%.

Figure 3.1: Predicted GMs and 95% confidence interval of quartz exposure by trade



^A Median GM across the 20 iterations for the exposure scenario of year 1999, duration of 480mins and exclusion of values from unreported categories

Table 3.6: Fractions of exposures expected to exceed the ACGIH TLV and Québec OEL by trade based on predicted geometric means and residual standard deviation

Trade	GM (mg/m ³) ^A	Group exceedance fraction (Θ) by OEL	
		ACGIH 0.025mg/m ³	Québec 0.1 mg/m ³
Driller	0.214	88%	66%
Underground worker	0.191	86%	64%
Roofer	0.146	83%	58%
Cement finisher	0.125	81%	55%
Bricklayer	0.095	76%	49%
Pipeline laborer	0.057	67%	38%
Semiskilled worker	0.055	66%	37%
Laborer	0.052	65%	36%
Foreman	0.047	63%	34%
Heavy equipment operator	0.041	61%	32%
Other	0.021	46%	20%

^A Median GM across the 20 iterations for the exposure scenario of year 1999, duration of 480mins and exclusion of values from unreported categories

3.5. Discussion

To our knowledge, the crystalline silica occupational exposure databank for the construction sector is currently the largest of its kind that involves exposure data collected from the literature. This study used a subset of measurements representative of full-shift exposure to develop predictive models and estimate the effect of key determinants of exposures for 10 trades of the construction sector. This study also used methods seldom reported in the occupational hygiene literature to take into account non-detects without resorting to substitution, and account for model selection uncertainty.

3.5.1. Descriptive analysis

The total median GM of 0.084 mg/m^3 is more than 3 times the TLV of 0.025 mg/m^3 , yet is lower than the GM reported in Flanagan *et al.* (2006), with a similar GSD. RSDs by category were generally in the 1–3% range, lower than those reported in Lavoué *et al.* (2007) for formaldehyde exposure, due in most part to the low proportion of simulated measurements in this study, 16.9% compared to 82–85% in that study.

Since the dataset was mostly comprised of published exposure data following an extensive review, the results of our analysis are likely to be comparable to those of individual studies. For instance compared to Flanagan *et al.* (2006), our GM for the cement finishers (0.153 mg/m^3), bricklayers (0.132 mg/m^3) and heavy equipment operators (0.045 mg/m^3) were similar (0.16, 0.13 and 0.05 mg/m^3 , respectively). However our GM for laborers was lower (0.064 vs. 0.14 mg/m^3). This difference could be due to the trade definitions used in Quebec, where a distinction is made between unskilled and semi-skilled laborers, the latter category involving tasks such as masonry sawing or chipping and concrete mixing, among others.

3.5.2. Statistical modeling

The proportion of the variance explained by the model containing all the variables and interactions was relatively low with a mean of 21.6%, which is somewhat lower than the R^2 of 29% reported by Flanagan *et al.* (2006). The small proportion of explained variance is on par with other studies of exposure databanks in the presence of important amounts of unreported data for key exposure determinants (Gomez, 1997; Melville and Lippmann, 2001). The low coefficient of determination also suggests that the trade itself is a relatively poor predictor of work shift silica exposure. In this context, some studies have argued that task-based exposure assessment strategies are preferable for industries with highly variable work conditions, such as construction (Goldberg *et al.*, 1997; Susi *et al.*, 2000).

3.5.3. Determinants of exposure

In spite of the relatively low coefficient of determination, statistical modeling provided estimates of the effect of several important determinants of respirable silica exposure in the construction sector. For instance, while the workspace and use of control methods variables were relatively mild predictors of exposure, their RIEs were in the anticipated directions, as the use of control methods led to a decrease in exposure levels compared to uncontrolled exposures, both outdoors and indoors. Different types of control method from general ventilation to tool-based are available and vary in effectiveness and suitability with the task performed. However, the analysis of the specific type of engineering controls in this study was not possible due to sample size constraints and missing information for majority of the exposure measurements in the dataset.

The decrease in exposure levels associated with an increase in sampling duration observed in this analysis was also found by other studies (Kolstad *et al.*, 2005; Lavoué *et al.*, 2006; 2011), where longer sampling lengths could include periods of “no exposure” compared to samples of shorter durations. On the other hand, the association between shorter sampling durations and higher exposure could also be due in part to avoid exceeding the maximum filter dust loading of the analytical method. Conversely, longer sampling times might be necessary in low exposure situations in order to collect sufficient material to meet the method’s detection limit. In this case, the results associated with shorter sampling times could be seen as being representative of work shift exposure, and there would be no need to account for this variable. A sensitivity analysis which excluded the sampling duration variable from the models was performed, and resulted in larger predicted GMs for most trades by approximately 30%, and exceedance fractions of the TLV were over 90% for all trades. However, these results did not change the conclusions of overexposure for all the construction trades evaluated in this study.

Sampling year was an important predictor along with its interaction with sampling strategy, which is reflected by the sharp contrast in the annual trends found between the two categories. At the beginning of the period covered by the dataset, the exposure levels from compliance assessment were higher than those from the other sampling strategy while the inverse pattern is found in 2006, with both trends converging in 1999. Long term annual trends reported in the literature are usually either stable or a moderate decrease in exposure levels, such as in Creely *et al.* (2007). Regarding the compliance strategy, OSHA inspectors tend to target industries, worksites and/or workers with a potential of higher exposures (Froines *et al.*, 1986; Henn *et al.*, 2011) and might be less representative of the conditions in all workplaces (Stewart and Rice, 1990). However, at the end of the time period covered in the dataset, the effect for the inspection strategy was lower than the other strategies, which goes contrary to

the expectations of a “worst-case” approach. Our observations could be explained by the use of different sources of exposure data, collected under different objectives in a non-random fashion, and thus result from some form of confounding. To attenuate any bias caused to predictions, they were made using an equal weight for both sampling strategies and the median sampling year of the dataset.

3.5.4. Predicted exposures for trades

The predictions for trades using our exposure scenario were generally in agreement with their respective “raw” GMs, with trades such as heavy equipment operator and foreman, less likely to involve tasks generating high levels of silica, with the lowest predicted GMs. Estimated GMs between 0.1 and 0.15 mg/m³ included bricklayers, cement finishers and roofers, with tasks involving grinding and sawing of mortar or concrete. The two trades with the highest exposures – underground workers and drillers – had their order reversed using the model compared to their GMs reported in Table 3.1: underground workers, although the difference is not significant based on 95% confidence intervals.

The predicted exceedance fractions of the ACGIH TLV of 0.025 mg/m³ were all substantially above the threshold of 5% deemed acceptable (Leidel *et al.*, 1977), indicating a situation of generalized overexposure for the trades evaluated. The four trades evaluated by Rappaport *et al.* (2003) – bricklayers, laborers, operating engineers and painters – all had unacceptable exceedance fractions based on the previous silica TLV of 0.05 mg/m³, ranging from 64.5% to 100%. This study used repeated measurements to assess between and within worker variance components, which was not the case in our study due to the use of external sources of exposure data. Additional analysis using the GSDs by trade reported in Table 3.1 instead of the residual GSD did not affect the conclusions of overexposure (results not shown).

3.5.5. Unreported data

There was over 50% missing data for some key parameters in this study, such as project type, construction sector, environment and use of control methods, which might have had an impact on the RIEs and exposure estimates for trades, as the “unreported” categories were left out of the exposure scenario. Median GMs of the 4 categories labeled as “unreported” in Table 3.1 were four times the TLV, and were the categories with the highest GMs for the project type and use of control methods determinants. This situation complicates the understanding of the sources of variability in respirable quartz exposures, and this issue was also present in other literature-based exposure database analyses (Caldwell *et al.*, 2001; Flanagan *et al.*, 2006; Gold *et al.*, 2008). The implementation of methods to estimate missing categorical data through multiple imputation has been used successfully in other fields such as social and environmental sciences (Chen and Åstebro, 2003; Molitor *et al.*, 2006), and can be implemented in a model averaging framework (Schomaker *et al.*, 2010). They could represent a promising avenue to address this issue.

3.6. Conclusion

In this study, we used data gathered from the published literature to estimate work shift respirable quartz exposures by trade and provide quantitative estimates of the effect of determinants found on worksites using multimodel inference. The predictions for the 10 trades in the dataset suggest that exposure levels are frequently above the TLV, and that interventions are required to reduce the potential long term health effects related to silica. The predictive value of the construction trades on work shift exposure was found to be relatively low, which could be due the nature of the different tasks and the frequency and duration in which they are performed within each trade category. A task-based approach could

therefore refine the understanding of the variability in exposure levels in the construction sector and provide guidance in the assessment and control of occupational hazards related to silica on construction sites.

3.7. References

Anderson DR. (2008) Model based inference in the life sciences : a primer on evidence. New York ; London: Springer.

Beaudry C, Dion C, Gérin M *et al.* (2011) Occupational exposure to silica in construction workers: A Literature Based Exposure Database. Unpublished manuscript.

Becker P, Flanagan ME, Akladios M. (2001) Development of an ACGIH construction industry silica exposure database overview. *Appl Occup Env Hyg*; 16: 781–3.

Brown HV. (1965) The history of industrial hygiene: a review with special reference to silicosis. *Am Ind Hyg Assoc J*; 26: 212–26.

Burnham KP, Anderson DR. (2002) Model selection and multimodel inference : a practical information-theoretic approach. 2nd Edition. New York: Springer.

Caldwell DJ, Armstrong TW, Barone NJ *et al.* (2001) Lessons Learned While Compiling a Quantitative Exposure Database from the Published Literature. *Appl Occup Environ Hyg*; 16: 174–7.

Chen G, Åstebro T. (2003) How to Deal with Missing Categorical Data: Test of a Simple Bayesian Method. *Organ Res Methods*; 6: 309–27.

Chisholm J. (1999) Respirable Dust and Respirable Silica Concentrations from Construction Activities. *Indoor and Built Environment*; 8: 94–106.

Choodari-Oskooei B, Royston P, Parmar MKB. (2011) A simulation study of predictive ability measures in a survival model I: Explained variation measures. *Stat Med*; Advance online publication. doi: 10.1038/ng571.

Creely KS, Cowie H, Van Tongeren M *et al.* (2007) Trends in Inhalation Exposure—A Review of the Data in the Published Scientific Literature. *Ann Occup Hyg*; 51: 665–78.

Flanagan ME, Seixas N, Becker P *et al.* (2006) Silica exposure on construction sites: results of an exposure monitoring data compilation project. *J Occup Environ Hyg*; 3: 144–52.

Froines JR, Wegman DH, Dellenbaugh CA. (1986) An approach to the characterization of silica exposure in U.S. industry. *Am J Ind Med*; 10: 345–61.

Gaffney SH, Panko JM, Unice KM *et al.* (2011) Occupational exposure to benzene at the ExxonMobil Refinery in Baytown, TX (1978-2006). *J Expos Sci Environ Epidemiol*; 21: 169–85.

Gold LS, De Roos AJ, Waters M *et al.* (2008) Systematic literature review of uses and levels of occupational exposure to tetrachloroethylene. *J Occup Environ Hyg*; 5: 807–39.

Goldberg M, Levin SM, Doucette JT *et al.* (1997) A task-based approach to assessing lead exposure among iron workers engaged in bridge rehabilitation. *Am J Ind Med*; 31: 310–8.

Gomez MR. (1997) Factors associated with exposure in Occupational Safety and Health Administration data. *Am Ind Hyg Assoc J*; 58: 186–95.

Gómez MR, Rawls G. (1995) Conference on Occupational Exposure Databases: A Report and Look at the Future. *Appl Occup Environ Hyg*; 10: 238–43.

Hein MJ, Waters MA, van Wijngaarden E *et al.* (2008) Issues when modeling benzene, toluene, and xylene exposures using a literature database. *J Occup Environ Hyg*; 5: 36–47.

Helsel DR. (2005) *Nondetects and data analysis : statistics for censored environmental data.*

Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.

Henn SA, Sussell AL, Li J *et al.* (2011) Characterization of lead in US workplaces using data from OSHA's integrated management information system. *Am J Ind Med*; 54: 356–65.

Hewett P. (2005) *A Conceptual Model For Generating Random Exposures For Use In Computer Simulations.* Technical Report 05-01. Morgantown, WV: Exposure Assessment Solutions.

<http://www.oesh.com/downloads/TR%2005-01%20COV%20Model.pdf> (accessed 10 Jun 2011).

Hornung RW, Reed L. (1990) Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Appl Occup Environ Hyg*; 5: 46–51.

Hurvich CM, Tsai C-L. (1989) Regression and time series model selection in small samples.

Biometrika; 76: 297–307.

IARC. (1997) *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans vol. 68: Silica, some silicates, coal dust and para-Aramid fibrils.* Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, World Health Organization.

InVS. (2008) *Banque de données d'une matrice emplois-expositions aux poussières alvéolaires de silice cristalline libre.* Institut de veille sanitaire, Département santé travail, Saint-Maurice, France. <http://www.bdsp.ehesp.fr/Fulltext/416270/> (accessed 28 Jun 2011).

Kauppinen T, Toikkanen J, Pedersen D *et al.* (2000) Occupational exposure to carcinogens in the European Union. *Occup Environ Med*; 57: 10–8.

- Kolstad HA, Sønderskov J, Burstyn I. (2005) Company-Level, Semi-Quantitative Assessment of Occupational Styrene Exposure when Individual Data are not Available. *Ann Occup Hyg*; 49: 155–65.
- Lavoué J, Bégin D, Beaudry C *et al.* (2007) Monte Carlo Simulation to Reconstruct Formaldehyde Exposure Levels from Summary Parameters Reported in the Literature. *Ann Occup Hyg*; 51: 161–72.
- Lavoué J, Droz PO. (2009) Multimodel Inference and Multimodel Averaging in Empirical Modeling of Occupational Exposure Levels. *Ann Occup Hyg*; 53: 173–80.
- Lavoué J, Gérin M, Vincent R. (2011) Comparison of Formaldehyde Exposure Levels in Two Multi-Industry Occupational Exposure Databanks Using Multimodel Inference. *J Occup Environ Hyg*; 8: 38–48.
- Lavoué J, Vincent R, Gérin M. (2006) Statistical Modelling of Formaldehyde Occupational Exposure Levels in French Industries, 1986-2003. *Ann Occup Hyg*; 50: 305–21.
- Lee L. (2010) NADA: Nondetects And Data Analysis for environmental data. <http://CRAN.R-project.org/package=NADA> (accessed 05 Oct 2011).
- Leidel NA, Busch KA, Lynch JR. (1977) Occupational exposure sampling strategy manual. Publication no. 77-173. Cincinnati, Ohio: Department of Health, Education, and Welfare, National Institute for Occupational Safety and Health.
- Lubin JH, Colt JS, Camann D *et al.* (2004) Epidemiologic evaluation of measurement data in the presence of detection limits. *Environ Health Perspect*; 112: 1691–6.

Lukacs PM, Thompson WL, Kendall WL *et al.* (2007) Concerns regarding a call for pluralism of information theory and hypothesis testing. *J Appl Ecol*; 44: 456–60.

Lumens MEGL, Spee T. (2001) Determinants of Exposure to Respirable Quartz Dust in the Construction Industry. *Ann Occup Hyg*; 45: 585–95.

Mazurek JM, Attfield MD. (2008) Silicosis mortality among young adults in the United States, 1968-2004. *Am J Ind Med*; 51: 568–78.

Melville R, Lippmann M. (2001) Influence of Data Elements in OSHA Air Sampling Database on Occupational Exposure Levels. *Appl Occup Environ Hyg*; 16: 884–99.

Molitor J, Molitor N-T, Jerrett M *et al.* (2006) Bayesian Modeling of Air Pollution Health Effects with Missing Exposure Data. *Am J Epidemiol*; 164: 69–76.

NIOSH. (2002) Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica.

Publication No. 2002–129. Cincinnati, OH: Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health.

NIOSH. (2008) Work-related lung disease surveillance report 2007. Publication No. 2008–143a.

Morgantown, WV: Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health.

Rappaport SM, Goldberg M, Susi P *et al.* (2003) Excessive Exposure to Silica in the US Construction Industry. *Ann Occup Hyg*; 47: 111–22.

Schomaker M, Wan ATK, Heumann C. (2010) Frequentist Model Averaging with missing observations. *Comput Stat Data An*; 54: 3336–47.

Sirajuddin A, Kanne JP. (2009) Occupational lung disease. *J Thorac Imaging*; 24: 310–20.

Stewart PA, Rice C. (1990) A Source of Exposure Data for Occupational Epidemiology Studies.

Appl Occup Environ Hyg; 5: 359–63.

Susi P, Goldberg M, Barnes P *et al.* (2000) The Use of a Task-Based Exposure Assessment Model

(T-BEAM) for Assessment of Metal Fume Exposures During Welding and Thermal Cutting. Appl

Occup Environ Hyg; 15: 26–38.

Therneau T, Lumley T. (2010) survival: Survival analysis, including penalised likelihood.

<http://CRAN.R-project.org/package=survival> (accessed 05 Oct 2011).

Tielemans E, Marquart H, De Cock J *et al.* (2002) A Proposal for Evaluation of Exposure Data.

Ann Occup Hyg; 46: 287–97.

Tjoe Nij E, Hohr D, Borm P *et al.* (2004) Variability in quartz exposure in the construction

industry: implications for assessing exposure-response relations. J Occup Environ Hyg; 1: 191–8.

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES NIVEAUX D'EXPOSITION À LA SILICE CRISTALLINE SELON LA NATURE DE LA TÂCHE EXÉCUTÉE

Article en préparation pour *Journal of Environmental Monitoring*

Silica exposure during construction activities: statistical modeling of task-based measurements from the literature.

Jean-François Sauvé¹, Charles Beaudry¹, Denis Bégin¹, Chantal Dion², Michel Gérin¹ and Jérôme Lavoué¹

^a Department of Environmental and Occupational Health, Faculté de Médecine, Université de Montréal, C.P. 6128 Succursale Centre-Ville, Montreal, Quebec, H3C 3J7, Canada

^b Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et Sécurité du Travail, Montréal, Québec, Canada.

Keywords: construction, silica, occupational exposure databank, determinants of exposure, task-based assessment

4.1. Abstract

Many construction activities can put workers at risk of breathing silica containing dusts, and there exist an important body of literature documenting exposure levels using a task-based strategy. In this study, statistical modeling was used to analyze a dataset containing 1566 task-based, personal silica measurements gathered from 47 sources to estimate exposure levels during construction tasks and the effects of determinants of exposure. Monte-Carlo simulation was used to recreate individual exposures from summary parameters, and the statistical modeling involved multi-model inference with Tobit models containing combinations of the following exposure variables: sampling year and duration, construction sector, project type, workspace, ventilation and controls. Exposure levels by task were predicted based on the median reported duration by activity, the year 1998, the absence of source control methods and an equal distribution of the other determinants of exposure. The model containing all the variables explained 59% of the variability and was identified as the best approximating model. Of the 27 tasks contained in the dataset, abrasive blasting, masonry chipping, tuck pointing and tunnel boring had estimated GMs above 0.1 mg m^{-3} based on the exposure scenario developed. Water sprays on tool and LEV were associated with a reduction of 80% and 64% in exposure levels compared to no control. The predictive model developed can be used to estimate respirable silica concentrations in a wide range of circumstances in the context of the important variability in the activities performed within and between days in this industry.

4.2. Introduction

The link between chronic inhalation of high concentrations of inorganic dust, especially in mining, and respiratory ailments dates back centuries.¹ Silicosis, an irreversible lung fibrosis, has been characterized by the end of the 19th century,² while occupational exposure to crystalline silica has been classified as a group 1 lung carcinogen by the International Agency for Research on Cancer since 1997.^{3,4} Driscoll *et al.*⁵ estimated that approximately 9000 deaths worldwide were due to silicosis for the year 2000 alone. It is estimated that there are over 3 million workers in the European Union and 350 000 in Canada potentially exposed to crystalline silica⁶ and 1.7 million in the United States.⁷

Since the 1990s, the construction sector has been the focus of several studies and initiatives to identify and assess sources of silica exposure and prevent silicosis,^{8,9} as silica is a constituent of numerous building materials such as concrete, rock, brick and sand.^{7, 10, 11} Studies by Lumens and Spee,¹² Rappaport *et al.*¹³ and Flanagan *et al.*¹⁰ have highlighted the extent and sources of overexposure for several construction trades and tasks.

The evaluation of exposure to silica in the construction industry remains challenging due to the tremendous variability in exposure determinants such as tasks, materials and worksite characteristics, among others. Construction sites involve a variety of constantly changing operations and specialized workers,^{14,15} and the duration of exposure within a work shift can vary depending on the activities performed.¹⁶ Many studies^{14, 17, 18} have sampled a limited number of workers and have cautioned against generalizing their results to the entire industry. Despite the impressive number of measurements contained in their silica exposure database, Flanagan *et al.*¹⁰ concluded that additional research is necessary to identify factors contributing to high exposure levels.

In order to improve knowledge about circumstances associated with hazardous levels of silica and document the effectiveness of engineering controls, an occupational exposure database of silica exposure in the construction industry was developed by Beaudry *et al.*¹⁹ The database was compiled from measurements of crystalline silica and associated determinants reported in the published literature of the last 20 years. It contains measurements of dust and silica in various fractions such as respirable and inhalable, sampled under different strategies (e.g. task-based, compliance assessment, etc).

Occupational exposure assessment to silica is usually performed on a work-shift sampling strategy for compliance purposes as the exposure limits are based on a 8h weighted average in most jurisdictions,²⁰ and for cancer risk assessment.²¹ However, some studies have instead advocated the use of a short term, task-based exposure assessment strategy for noise and contaminants that can be present on construction sites.²²⁻²⁴ Advantages associated with the task-based approach include a better characterization of « peaks » of exposure for tasks that could otherwise be « diluted » in a full-shift sample, a better characterization of exposure determinants and improved guidance in the selection of appropriate control methods.^{23, 25-28}

The objectives of this study were to estimate respirable silica exposure levels associated with construction activities and to quantify the effect of other determinants and exposure control methods, using a subset of the database consisting of measurements collected under a task-based sampling strategy.

4.3. Methods

4.3.1. Exposure database

The database was constructed following an extensive literature review of silica exposure data published between 1987 and 2009. The OEDB comprises 6125 results of crystalline silica (quartz and cristobalite) and dust exposure, representing a total of 11637 individual measurements, gathered from 116 sources of data. These sources include scientific papers, survey reports (such as NIOSH Health Hazard Evaluations) and existing databases provided by the French Institut de Veille Sanitaire²⁹ and the ACGIH construction committee.^{10, 30}

Ancillary information in this database include several parameters describing the exposure determinants (e.g. trade, task, construction sector, tools, materials) and sampling methodology (e.g. sampling duration, strategy, location – personal and area - and analytical method) for each result. The task, tool and material descriptions for each result were entered in the database as they were reported in the source of data. The database also includes a harmonized classification of these variables in order to simplify their analysis. For instance, the tasks descriptions of “Removing mortar between bricks”, “Grinding mortar between bricks”, “Mortar removal”, “Tuckpointing” and “Tuck pointing” were coded as Tuck pointing in the harmonized task description variable. A detailed description of the database construction process and the information contained within can be found in Beaudry *et al.*¹⁹

4.3.2. Database preparation

For this study, the data was selected from personal respirable silica measurements in the database collected under a task-based exposure sampling strategy. Measurements made with direct-reading equipment and with missing information on the sampling duration and/or task

evaluated were excluded. The results from experimental studies conducted to evaluate the effect of control methods in a laboratory setting were deemed less representative of field conditions and excluded from the analysis.

The original intent of this study was to evaluate the effect of tasks, tools and materials separately, but the lack of documentation for tools and materials and their strong correlation with the task performed prevented their inclusion in the analysis as separate variables. However, two task categories were associated with different tools and materials and enough data points to allow for a more refined analysis. Thus, the Masonry chipping task was broken down into three categories based on the tools used (Jackhammer, Other tools and Jackhammer & Other tools), while the Drilling task was separated into three categories based on the material (Concrete, Rock, Soil and Rock).

Furthermore, while the initial database had precise descriptions for the tasks and associated determinants, some of the categories had to be grouped to ensure a sufficient sample size for the statistical analysis, set to a minimum of 10 exposure measurements from at least 2 sources of data. New task categories created include Other foundation, Other excavation, Other roadwork and Other masonry. Similarly, control methods categories with fewer than 10 data points were also merged in a new category labeled Other. Industrial and Commercial construction sector categories were combined, and the Workspace categories were grouped on the basis of work performed either indoors or outdoors.

4.3.3. Summarized exposure levels

The database contains exposure data reported as either individual measurements or summary statistical (SS) parameters – i.e. 2 or more measurements summarized and reported as a geometric mean (GM) and standard deviation (GSD), arithmetic mean (AM), range, etc. In

order to include both types of data in the analysis, each set of summary parameters were processed as described in Lavoué *et al.*,³¹ in which the SS results not reported as a GM and GSD are transformed to these metrics, assuming a log-normal distribution of the exposure profile.

The log-transformed GM and GSD are then used to simulate individual exposures using equation 1, where Z is a random deviate from a standard normal distribution.

$$x = \exp (\ln(\text{GM}) + Z \times \ln(\text{GSD})) \quad (1)$$

Each SS result is replaced by a number of simulated exposures equal to the reported sample size, while the associated exposure variables remains unchanged. For instance, a GM and GSD associated with a reported sample size of 10 would result in 10 simulated individual measurements coupled with identical exposure determinants.

The simulated data is then combined with the other individual measurements prior to their analysis. Due to the variation inherent to the random simulation procedure, the procedure was repeated 100 times, with each replication containing identical single measurements and different simulated exposure values derived from the summary parameters.

4.3.4. Descriptive statistics

Table 4.1 presents the GM and GSD for each level of categorical determinant included in the analysis, computed using robust Regression on Order Statistics (ROS)³² to account for nondetects. This method involves fitting a normal distribution on the log-transformed detected measurements in order to model the censored observations. The summary statistics are then computed based on the combined detected and modeled censored data. The GMs and GSDs were computed for each of the 100 replicates of the database, with the median value taken as

the final estimate. The variability of the GMs across the 100 iterations was assessed by computing their relative standard deviation (RSD).

4.3.5. Modeling

Statistical modeling was performed using a multi-model averaging approach,³³ which has been recently applied in occupational health studies.³⁴ As the name implies, inference in this approach is based on a set of candidate models (the model set), instead of a single “final” model obtained by adding and removing variables. Multi-model inference thus does not assume that a single model is useful, and allows the evaluation of model selection uncertainty.³⁵

The model set was constructed by first including models containing all possible presence / absence combinations of the variables found in Table 4.1. As the main focus of this study was to estimate the effect of tasks and control methods, these two variables were included in all the models and resulted in a preliminary list of 64 unique model structures. The presence of dilution ventilation in the database was entered as a dichotomous “yes/no”, and did not discriminate between mechanical ventilation and wind. An interaction between workspace and ventilation was thus included in the set to account for differences between industrial ventilation indoors and wind outdoors, adding 16 model structures for a final model set size of 80 models.

Further data preparation prior to modeling included log-transformation of the respirable silica concentrations due to the positive skew of the exposure distribution. The sampling duration was also log-transformed, while the sampling year was normalized by subtracting the earliest sampling year of the dataset. For nominal variables, the categories with the largest sample size were selected as the reference levels.

The relative quality of models in multi-model inference is assessed by the computation of model weights calculated from a goodness-of-fit criterion – in this analysis, a modified Akaike Information criterion with a second-order correction (AICc).³⁶ The use of AICc is recommended when the ratio of total sample size to estimated model parameters is lower than 40,³⁷ which was expected based on preliminary analyses. The “Akaike weights” are based on the relative difference in AICc values between each model and the model with the lowest AICc, and add up to 1.³³ Each weight can be seen as the probability of the corresponding model being the best approximating model given the model set and the data. The Akaike weights can be used to rank the models, quantify the relative importance of explanatory variables through the computation of evidence ratios, and estimate averaged model coefficients and predictions.

The evidence ratios were computed by dividing the sum of the weights of the models containing a variable of interest by the sum of the weights for the models without it. An evidence ratio of 100 or more indicates strong support for a variable, while an evidence ratio below 0.01 suggests that the variable has little influence on the response.³⁸

Tobit – or censored regression – models^{39, 40} were used to account for measurements reported as below the limit of detection. In the absence of a consensus on the method used to approximate the proportion of variance explained with Tobit models,⁴¹ linear regression with non-detects substituted by LOD/2⁴² was used in order to compute the coefficient of determination (R^2) of the models containing all the variables. The modeling procedure was repeated 20 times to account for the variations related to the simulation of individual exposures derived from the summary statistics. The mean value of the regression coefficients across the replications was used as the estimate, while the variability between the iterations was assessed by computing the RSD for each coefficient.

Relative indices of exposure (RIE)⁴³ were calculated from the estimated model parameters to illustrate the effects of the various levels of categorical determinants relative to the reference category. A category with a RIE below 100% is associated with reduced exposure levels compared to the reference category, while a larger RIE indicates the opposite effect.

Exposure levels for tasks were estimated based on the median sampling year of the dataset, and the median sampling duration associated with each task. The exposure scenario developed also assumed an equal distribution of the other reported determinants of exposure – for instance, work being performed 50% indoors and 50% outdoors. However, the predictions were made without the effect of source controls since the different types were not applicable for some tasks, such as cleaning up or material handling. The other exceptions were for tasks associated only with specific work conditions in the dataset. These include Asphalt milling, Other excavation and Other foundation, which were only associated with outdoor work and Civil engineering construction sector, while Tunnel boring was associated only with indoor work environment and also the Civil engineering sector.

Data analysis was performed with the R 2.14.0 software, using the packages NADA^{44, 45} for the `ros` function to compute descriptive statistics using the ROS method, and `survival`⁴⁶ for Tobit models through the `survreg` function.

4.4. Results

4.4.1. Descriptive statistics

The dataset was comprised of 1566 measurements from 46 different publications. 445 results (28%) consisted of single measurements, including 94 reported as non-detects. The median total GM based on the 100 replications was 0.057 mg m^{-3} (RSD 2.4%), with a median GSD of 8.9 (RSD 2.3%). The median sampling year was 1998 (range 1988-2007) and a median sampling duration of 333 minutes (range 4-775, interquartile interval 210-390).

The median RSD for tasks containing simulated values derived from summary parameters was 14% (interquartile interval 10-19%), while the RSDs for the other determinant categories were generally lower with a median of 4%. The three tasks with the largest variation in the estimated GMs between the 100 iterations as assessed by the RSDs were Drilling – Soil and Rock (57%), Cleaning up (31%) and Other demolition (29%).

Table 4.1: Respirable silica concentrations, proportion of non-detects and measurements derived from summary statistics and median sampling durations by exposure variables.

	N	GM ^A (mg m ⁻³)	GSD ^B	RSD ^C (%)	ND ^D (%)	SS ^E (%)	Duration ^F (min)
Total	1566	0.057	8.9	2	6	72	333
Task							
Abrasive blasting	23	0.798	6.5	19	4	61	315
Chipping - Jackhammer and other tools	109	0.606	5.4	14	5	95	210
Chipping - Jackhammer	56	0.460	2.7	0	7	0	81
Scabbling concrete	12	0.428	3.2	0	50	0	5
Tunnel boring	45	0.318	3.2	13	0	91	390
Tuck pointing	82	0.258	7.7	5	12	12	256
Cutting	131	0.223	5.7	9	3	68	210
Other masonry	45	0.126	5.5	4	0	60	151
Chipping - Other tools	21	0.126	7.4	0	10	0	104
Material handling - manual	11	0.086	2.6	0	9	0	212
Surface grinding/finishing	213	0.072	8.6	7	0	99	309
Material handling - mechanical	13	0.066	4.0	0	8	0	120
Drilling - Concrete	43	0.064	10.3	18	33	33	390
Sanding	31	0.047	7.2	0	42	0	185
Other demolition	32	0.032	5.9	29	0	97	334
Drilling - Rock	122	0.031	3.9	10	0	98	390
Asphalt milling	40	0.023	2.8	0	10	0	218
Drilling - Soil and rock	13	0.021	6.2	57	15	62	283
Concrete spraying	94	0.018	3.4	10	0	87	390
Roadwork - other	47	0.018	3.9	8	6	51	350
Erecting concrete pouring forms	159	0.015	5.5	11	0	98	390
Cleaning up	15	0.013	4.0	31	0	100	390
Electrical maintenance	41	0.013	2.5	14	0	100	390
Cutting and installing ceiling tiles	42	0.011	7.9	22	45	50	320
Material mixing	26	0.011	4.6	17	19	50	336
Other excavation work	56	0.010	4.0	20	0	100	341
Other foundation work	44	0.008	2.9	14	0	100	356
Construction sector							
Other/Unreported	532	0.248	7.0	4	6	60	210
Residential	35	0.126	5.0	0	37	0	81
Industrial and Commercial	161	0.084	8.5	4	19	34	75
Civil engineering & Roadwork	838	0.021	5.4	4	3	89	380
Project type							
Other/Unreported	532	0.211	7.4	4	8	57	210
Renovation	191	0.080	10.2	0	21	0	221
New construction	843	0.024	5.8	4	1	97	370

Table 4.1: Respirable silica concentrations, proportion of non-detects and measurements derived from summary statistics and median sampling durations by exposure variables (continued).

	N	GM (mg/m ³)	GSD	RSD (%)	ND (%)	SS (%)	Duration (min)
Workspace							
Open/Exterior	680	0.037	9.1	3	5	64	304
Enclosed/Indoors	578	0.042	6.6	5	9	72	390
Unreported	308	0.256	7.2	6	2	88	210
Ventilation							
Yes	545	0.027	6.2	5	1	89	390
No	463	0.209	7.2	4	11	48	180
Unreported	558	0.042	8.5	5	7	74	315
Controls (source)							
None	734	0.080	9.8	4	3	78	360
Other	21	0.012	2.7	0	29	0	238
Water (surface)	104	0.022	5.2	10	6	86	390
Water (tool)	38	0.049	3.6	0	26	0	144
Unreported	495	0.031	7.5	5	8	73	331
Local exhaust ventilation (LEV)	174	0.179	6.5	6	8	55	168

^A Median value of the geometric mean with Regression on Order Statistics from the 100 iterations

^B Median value of the geometric standard deviation with Regression on Order Statistics from the 100 iterations

^C Relative standard deviation of the geometric means across the 100 iterations

^D Percentage of values reported as under the limit of detection

^E Percentage of values reported as summary statistics and simulated

^F Median of the reported sampling duration in minutes

The sample sizes, median GMs and GSDs, RSDs of the GMs across the 100 iteration, proportion of non-detects and simulated values and median sampling duration for each level of the categorical variables are listed in Table 4.1. Of the 27 tasks contained in the dataset, the largest median GM was found for abrasive blasting (0.798 mg m⁻³), followed by Chipping - Jackhammer and other tools (0.606 mg m⁻³). The GSDs for the task categories varied from 2.4 to 10.1 with a median of 4.6. 5 tasks had a median sampling duration under 3 hours, the shortest being Scabbling concrete, with a median of 5 minutes, followed by Chipping - jackhammer with 81 minutes.

4.4.2. Modeling

The mean percentage of variance explained by the model containing all the variables and the Workspace*Ventilation interaction was 59% (range 57-60%) across replications. For the multimodel approach, this model structure was associated with a weight very close to 1; consequently, the relative importance of all the variables included was very high with evidence ratios above 50 000. The estimated model parameters averaged across the 20 iterations along with their RSDs are presented in Table 4.2. The median RSD of the model coefficients was 12% (interquartile interval 7%-18%).

4.4.3. Effects of exposure determinants

There were substantial negative trends in exposure levels associated with both the sampling duration and sample year variables. An increase of 50% in sampling duration (e.g. from 30 to 45 minutes, or from 2 hours to 3 hours) was associated with an 18% reduction (95% approximate Confidence interval (CI) 12-24%) in respirable quartz concentrations. The annual trend modeled consisted of a reduction of exposure levels by 11% (95%CI 7-14) per year.

Table 4.2: Coefficients from the multimodel inference procedure, averaged over 20 iterations

	ln Quartz (mg/m3)				ln Quartz (mg/m3)		
	β^A	SE ^A	RSD ^B (%)		β^A	SE ^A	RSD ^B (%)
Intercept	-1.122	0.566	15	Task (continued)			
ln(sample duration (min))	-0.494	0.089	7	Drilling - Soil and rock	-1.569	0.418	26
Sample year (-1988)	-0.114	0.021	7	Concrete spraying	-0.882	0.317	15
Task				Roadwork - other	-1.980	0.264	11
Abrasive blasting	1.812	0.374	17	Erecting concrete pouring forms	-0.956	0.176	9
Chipping - Jackhammer and other tools	1.652	0.290	10	Cleaning up	-1.566	0.442	30
Chipping - Jackhammer	0.583	0.332	13	Electrical maintenance	-1.713	0.278	9
Scabbling concrete	1.217	0.572	8	Cutting and installing ceiling tiles	-1.367	0.294	27
Tunnel boring	1.355	0.269	12	Material mixing	-2.070	0.331	11
Tuck pointing	1.183	0.296	14	Other excavation work	-1.780	0.252	18
Cutting	-0.399	0.255	25	Other foundation work	-1.994	0.271	13
Other masonry	-0.493	0.319	27	Construction sector			
Chipping - Other tools	-0.042	0.362	264	Other/Unreported	2.270	0.286	4
Material handling - manual	-1.330	0.501	13	Residential	0.685	0.405	10
Surface grinding/finishing	Reference			Industrial and Commercial	-0.454	0.254	17
Material handling - mechanical	-1.488	0.456	13	Civil engineering & Roadwork	Reference		
Drilling - Concrete	0.279	0.317	66	Project type			
Sanding	-1.367	0.383	15	Other/Unreported	-1.099	0.262	8
Other demolition	-0.608	0.299	52	Renovation	0.141	0.269	54
Drilling - Rock	-0.851	0.210	21	New construction	Reference		
Asphalt milling	0.830	0.497	11				

Table 4.2: Coefficients from the multimodel inference procedure, averaged over 20 iterations (continued)

	ln Quartz (mg/m3)		
	β^A	SE ^A	RSD ^B (%)
Workspace			
Unreported	1.501	1.021	5
Enclosed/Indoors	2.591	0.196	4
Open/Exterior	Reference		
Ventilation			
No	3.221	0.260	4
Unreported	5.228	0.389	4
Yes	Reference		
Controls (source)			
LEV	-1.024	0.184	6
None	Reference		
Water (tool)	-1.596	0.378	3
Unreported	-3.194	0.337	5
Water (surface)	-0.684	0.287	23
Other	-0.443	0.461	15
Workspace : Control methods			
Interior : Without controls	-3.409	0.327	3
Unreported : Without controls	-2.613	1.049	5
Interior : Unreported	-4.115	0.342	5
Both unreported	-2.037	1.036	7

^A Average estimated parameter values of the 20 iterations

^B Relative standard deviations of the model coefficients over the 20 iterations

The RIEs by construction sector, project type and source-based control methods are presented in Table 4.3. For the construction sector variable, compared with the reference category Civil engineering & Roadwork, the Industrial and Commercial category was associated with lower exposure levels (RIE 64%), while higher levels were observed for the Residential category (198%), although the confidence bounds for both categories covered 100%. Similarly, the effect of Renovation (RIE 115%) for the project type variable was comparable to the New construction reference.

Table 4.3: Relative indices of exposure of construction sectors, project types and control methods

Construction sector	RIE (%) (95%CI)
Civil engineering & Roadwork	Reference ^A
Industrial and Commercial	64 (39-105)
Residential	198 (90-439)
Project type	
New construction	Reference
Renovation	115 (68-195)
Controls (source)	
None	Reference
Other	64 (26-159)
Water (surface)	50 (29-89)
Water (tool)	20 (10-42)
LEV	36 (25-51)

^A RIE of the reference level taken as 100%

Both LEV (RIE 36%, 95%CI 25-51) and water sprays attached to the tool (RIE 20%, 95%CI 10-42) were associated with important reductions in exposure levels compared to uncontrolled operations. Smaller reductions were found for the water on surface (RIE 50%, 95%CI 29-89) and other control types (RIE 64%, 95% CI 26-159), the latter including source isolation and combined use of two more types of control methods.

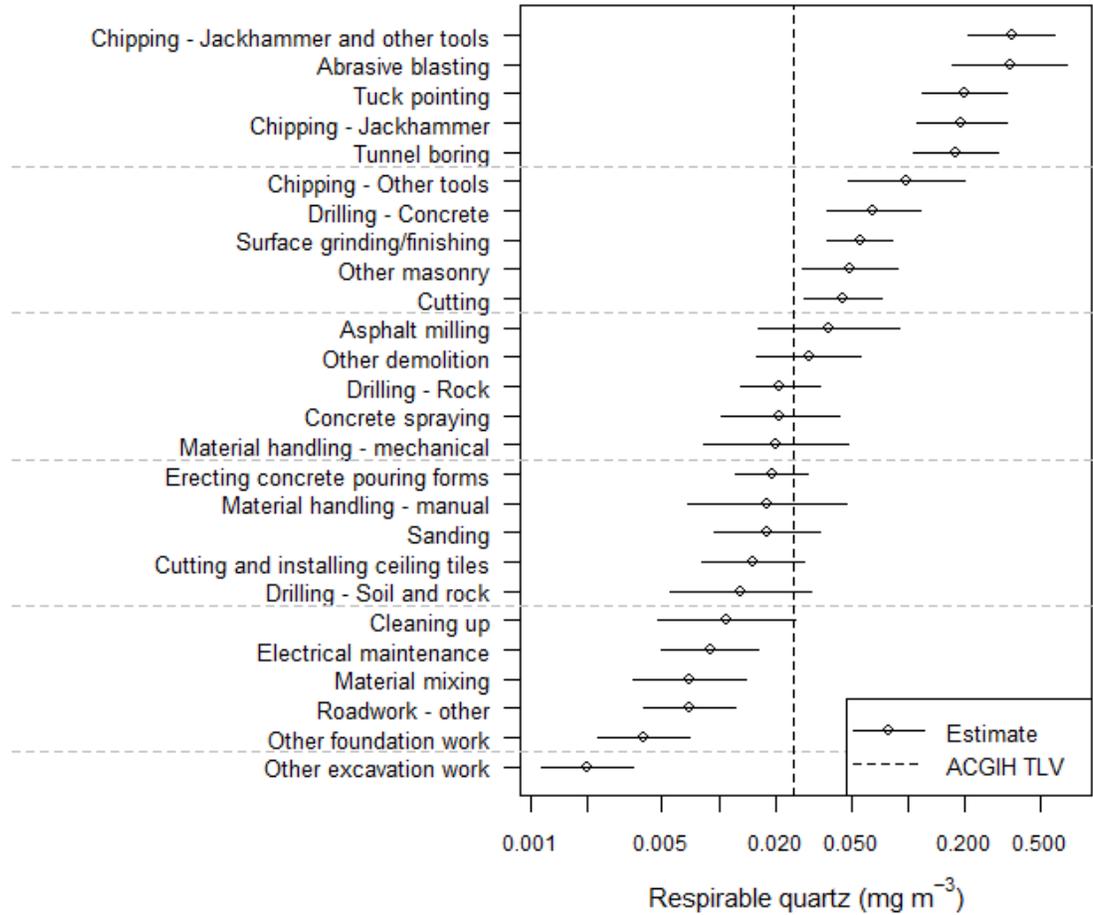
The influence of dilution ventilation outdoors (wind) was very important with the absence of wind associated with a 25-fold increase in exposure compared to the reference category of Outdoor: with ventilation. For work being performed indoors, the effect was an important increase in concentrations either with mechanical ventilation (RIE 1336%) or without (RIE 1106%) compared to the reference, although the difference between the RIEs with and without ventilation in this setting was much lower than for the exterior workspace.

4.4.4. Estimated exposure levels by task

The estimated exposure levels by task, based on the median sampling year of the dataset and median duration by task across the 20 iterations are presented in Figure 4.1, with the exception of the scabbling concrete due to its very high value compared with the other results. This task had estimated GM of 1.446 mg m^{-3} , which is more than four times the value of the tasks with the second and third largest GMs, chipping - other tools (0.354 mg m^{-3}) and abrasive blasting (0.349 mg m^{-3}).

Tuck pointing (0.200 mg m^{-3}), chipping – jackhammer (0.193 mg m^{-3}) and tunnel boring (0.182 mg m^{-3}) were the other tasks with a mean predicted GM above 0.1 mg m^{-3} . At the other end of the spectrum, 14 of the 27 task categories had an estimated GM lower than the respirable silica TLV of 0.025 mg m^{-3} , including most of the support/ancillary tasks (e.g. material handling and mixing, erecting concrete pouring forms, cleaning up and electrical maintenance).

Figure 4.1: Estimated geometric mean silica exposure by task, based on the median sampling duration by task and averaged across 20 iterations



* Estimated GM for scabbling concrete omitted (GM of 1.446 mg m⁻³).

4.5. Discussion

This project used task-based exposure data gathered from the literature in order to estimate levels associated with construction activities and to quantify the effects of other exposure determinants. Compared with the 1374 respirable quartz measurements compiled in the silica data project of the ACGIH Construction Committee and analyzed by Flanagan *et al.*,¹⁰ the 1566 exposure records contained in our study covered a broader range of tasks (27 vs. 16) and a longer time period (1988-2007, compared to 1992-2002), and included data from several countries. We estimate that less than 2% of the dataset – exposure data sourced from NIOSH environmental surveillance reports – is shared with the ACGIH database. This difference is due to our dataset being restricted to task-based measurements, whereas the ACGIH database was comprised mainly of results from compliance assessments which we considered to be more representative of work-shift exposure. The 27 tasks categories in our dataset encompassed many activities that involves direct disturbance of building materials containing silica – such as grinding and drilling – and also those of a support nature (e.g. cleaning up, material handling). The range of construction activities covered can allow for a more detailed assessment of work-shift exposure based on the nature and duration of individual tasks performed within a shift.

4.5.1. Descriptive statistics

The total median GM in this study (0.057 mg m^{-3}) was approximately half the total GM of the ACGIH database reported by Flanagan *et al.* (0.13 mg m^{-3}),¹⁰ and can be due to the differences in the exposure data used in our dataset, notably the exclusion of measurements from legal compliance evaluations. Of the three data sources in the ACGIH database, the measurements from regulatory agencies had the highest GM (compared to research or private organizations). The large total median GSD of 8.9 in our dataset is consistent with the studies

of Flanagan *et al.* and Tjoe Nij *et al.*¹⁷ that reported overall GSDs of 5.9 and 7.0, illustrating the important variability in silica exposure levels. The variability within task categories was also considerable as only 5 of the 27 tasks in this analysis had estimated GSDs lower than 3, which is also comparable to the ACGIH database where only 1 out of 16 tasks had a GSD under this threshold.

Regarding the variability associated with the simulation procedure in the estimation of GMs for categorical determinants, most of the RSDs across the 100 replications of the dataset were below 20% for the task categories, and 10% for the other determinants. These results are comparable to those reported by Lavoué *et al.*³¹ in the analysis of formaldehyde exposure data from the literature, with a slightly higher proportion of simulated measurements (83% and 85%, compared to 72% in this study) and using 1000 iterations. The variation in the estimated GMs as assessed by the RSDs did not appear to be associated with the proportion of measurements derived from summary statistics in the different categories. Our results thus suggest that relatively precise estimates of the GMs can be obtained with 100 replications regardless of the proportion of simulated measurements.

4.5.2. Modeling

The model containing all the variables and the interaction explained an important proportion of the variability in exposure levels with a mean R^2 of 59%, which is comparable to many determinants of exposure studies reviewed by Burstyn and Teschke.²⁷ The computation of a pseudo- R^2 from the scale parameter of the Tobit model containing all the variables and a model containing only the intercept, as described by Hein *et al.*⁴⁷ yielded a similar result to the substitution approach with a mean of 60% based on 20 iterations. Compared to our study, the modeling of the quartz measurements by Flanagan *et al.*¹⁰ resulted in a coefficient of

determination of 29%; however the final model did not contain the task variable and their dataset contained few task-specific exposure data. Our result is more comparable to a determinants of exposure study by Lumens and Spee¹² investigating four construction trades with models explaining 64% to 82% of the variability in respirable quartz concentrations, depending on the model and population.

The results for the multi-model approach showed that the computation of model coefficients and predictions were based exclusively on the model structure containing all the variables. The computer resources needed for fitting the 160 models of the set could therefore be dedicated to using a greater number of simulations with a single model structure; however, such *post hoc* data analysis is generally discouraged.³³ Nonetheless, a sensitivity analysis using only this model structure and 1000 replications of the database resulted in similar proportions of explained variance, regression coefficients and predictions compared to those obtained with the 20 iterations (results not shown).

Despite the important proportion of variability explained in our analysis, the residual GSD of 4.1 suggests that other factors affecting exposure were unaccounted for in the model. The inclusion of other potential exposure variables in the models - for instance other dust source or use and type of respirators – was considered but ultimately rejected due to too much missing information in the dataset. Linear mixed-effect models using publication as a random effect^{31, 48} and substituted non-detects were also investigated but abandoned. The construction sector and source control variables were too closely associated with the publication variable, which gave rise to effects that were difficult to interpret. Similar issues regarding the use of mixed-effect models (with publication as a random effect) were also found by Hein *et al.*^{47, 49} in their analyses of aromatic and chlorinated solvent exposures from the literature.

4.5.3. Effects of exposure determinants

The decrease in exposure levels related to an increase in sampling duration seen in this study was also found in other analyses of existing exposure data.^{10, 31, 50} Activities with lower exposures might require a longer sampling time in order to collect sufficient material to ensure a detected result by the analytical method and could explain this association. This effect can also be due to the inclusion of periods with low or no exposure associated with longer sampling times^{51, 52} and, in our analysis, can be related to the different sampling practices used between the studies included in the dataset. For example, one study included a pause/stop mode on their sampling train to sample exclusively during the actual concrete grinding,⁵³ while another sampled workers during tuck pointing and included break times.⁵⁴ As the predictions were made based on the median sampling duration by task, some of them associated with longer sampling times might therefore include periods of no exposure.

The downward annual trend of -11% found in our study is similar to the median annual decrease of -8% reported by Symanski *et al.*⁵⁵ based on approximately 700 datasets published between 1967 and 1996. Several factors such as technological development and administrative changes have been identified to explain the decreasing exposure levels over time.⁵⁶ In our study however, it is difficult to interpret this decline as the data is not likely to contain a great amount of repeated measurements for the same task in similar conditions in the time period covered. Thus this effect could also be due in part to the different tasks and environmental conditions evaluated at different points in time in our dataset.

The RIEs for the workspace*ventilation interaction in our study suggest that exposure levels are largely lower in an exterior environment with windy conditions. This effect was also found in a study conducted on construction sites in Québec,⁵⁷ and by Akbar-Khanzadeh and

Brillhart⁵³ during concrete finishing, although not statistically significant for the latter. General ventilation indoors had little impact on exposure levels in our study, although Akbar-Khanzadeh *et al.*⁵⁸ reported a 66% decrease with ventilation during concrete surface grinding, albeit in a field laboratory setup with controlled conditions. A smaller effect was found by Almaguer *et al.*⁵⁹ with a reduction of 25% using general exhaust ventilation while jackhammering hardened concrete in mixing trucks.

The 64% and 80% estimated decreases in silica exposure levels estimated in this study for LEV and tool-mounted water spray control methods were on the low end of the spectrum of the reductions reported in some experimental studies, which were not included in our dataset. For instance, studies investigating the effect of commercially available tool-based LEV systems on respirable quartz concentrations during tuck pointing, surface grinding, and concrete cutting, reported reductions in exposure levels from 70% to 99.7%.⁶⁰⁻⁶³ Similarly, tool-based water sprays reduced exposure levels up to 80-94% during tuck pointing⁶⁴, surface grinding⁵⁸, brick cutting⁶⁵ and cold asphalt milling.⁶⁴ The comparable, albeit milder results we found using data from field conditions is encouraging in that engineering control methods are effective in reducing respirable silica concentrations in the presence of many other factors that can affect exposure.

4.5.4. Estimated exposure levels by task

The distribution of the predicted GMs went in the anticipated direction, with support tasks such as material handling, mixing and cleanup in the lower tier of Figure 4.1, while the chipping tasks, abrasive blasting, tunnel boring and tuck pointing were associated with the largest exposures. The very large estimate for concrete scabbling was due to the very short (5 minutes) median sampling duration compared to the other tasks, but would result in a TWA

lower than the current ACGIH TLV of 0.025 mg m^{-3} if no other silica exposure would occur during the remainder of an 8 hour work shift. While the predicted level for this task had a substantial increase (238%) compared to its estimated GM with robust ROS in Table 4.1, the difference for the majority of the other tasks was negative with a median decrease of 38% (interquartile interval 9%-59%). The differences between the two estimates are mostly due to the prediction scenario, which excluded the effects of “unreported” levels which were very large for the construction sector and ventilation categories.

Compared with the GMs for tasks in the quartz exposure data compiled by Flanagan *et al.*,¹⁰ the predicted levels in this study were similar for abrasive blasting (0.24 mg m^{-3}) and tunnel boring (0.25 mg m^{-3}). On the other hand, their two tasks with the highest GMs, tuck pointing (0.60 mg m^{-3}) and surface grinding (0.29 mg m^{-3}) were associated with much lower predicted exposure levels in our study (0.200 mg m^{-3} and 0.056 mg m^{-3} respectively). The “raw” GMs for these two tasks (in Table 4.1) were also lower in our dataset, and the differences with the corresponding results in Flanagan *et al.* are likely to be attributable to the different exposure data used between the two studies. The distribution of the tasks is generally comparable between the two studies, with abrasive blasting, tuck pointing, tunnel boring, concrete drilling and surface grinding associated with the highest silica exposures.

The effects of source control methods were not included in the prediction scenario (i.e. only the reference category of “none” was considered) as they were incompatible with some of the task categories in our dataset. However, exposure scenarios can be developed for any combination of the determinants listed in Table 4.2 in order to estimate silica concentrations in a variety of settings, different durations and the effect of source control methods. For instance, with tuck pointing and the three chipping task categories, the inclusion of LEV in our exposure scenario would still result in an estimated GM above the TLV of 0.025 mg m^{-3} for 8

hours. For tuck pointing with LEV, this result was also found in most studies reviewed by Flynn and Susi⁶⁶ and thus the use of appropriate respiratory protection would be required to meet this threshold if this task was performed continuously for an 8-hour shift.

4.5.5. Study limitations

The lack of information on the contexts and determinants associated with exposure data in the published literature and occupational exposure databases has been identified in several studies^{10, 50, 67, 68} and can present a challenge in the data analysis and interpretation of the findings. The percentage of unreported descriptions for the construction sector, project type, workspace, use of ventilation and control methods variables in our dataset ranged from 20% to 36%. The exclusion of results containing at least one unreported exposure determinant other than sampling duration, year and task in our dataset would have decreased the sample size to 697 measurements and the number of task categories to 16. We therefore opted to keep these results in the analysis in order to cover the most circumstances of silica exposure associated with construction activities. The missing information on exposure determinants in our dataset was also not evenly distributed across the 1566 measurements, which had an impact on the model coefficients. For instance, the effect of the unreported project type category was negatively correlated with the unreported construction sector, thus when information on one was missing, it was usually missing for the other. The same effect was also found between the use of source controls and the presence of ventilation, which were also frequently not reported together within the same publication. This issue was circumvented by excluding the effects associated with the unreported levels of the categorical variables in our prediction scenario.

Some situations were also less documented in this dataset despite the amount of exposure data compiled. This includes the tool-mounted water spray control method, although its effectiveness has been investigated in several experimental studies¹⁹ which were excluded from our dataset, and the effect of source isolation. Also support activities such as cleanup and material preparation generally had fewer measurements compared to grinding, drilling, chipping and cutting, which reflects an emphasis on studying tasks known to be associated with higher exposures. Finally, only 35 exposure measurements were associated with the residential sector, which is characterized by small firms and has traditionally been less studied.⁶⁹ The results for these underdocumented factors can thus be seen as more uncertain and might not be applicable to all construction sites.

Despite the difficulties related to the use of exposure data from the published literature, these sources can provide a wealth of information to gain a better understanding of the factors linked with respirable silica concentrations during construction activities. Furthermore, this compilation of silica exposure data in the construction sector addresses the issue of the limited range of conditions evaluated in many individual studies and covers a broader spectrum of contexts and worksite characteristics. However, additional measurement data would be needed to document factors associated with task-based exposure in the residential sector.

4.6. Conclusion

In summary, we used task-based exposure data compiled from the literature to estimate respirable silica concentrations for 27 construction activities and the effects of the use of engineering control methods and worksite characteristics. The statistical model included in this analysis based on 9 exposure determinants explained an important amount of the exposure variability. This model can thus be used to predict respirable quartz concentrations for a range

of tasks that can be performed during a work shift as part of an exposure assessment program to anticipate, evaluate and control occupational silica hazards in the dynamic environment of construction sites.

4.7. References

1. H. V. Brown, *Am Ind Hyg Assoc J.* 1965, **26**, 212-226.
2. S. D. Stellman, *Soz Praventivmed.* 2003, **48**, 151-160.
3. International Agency for Research on Cancer, *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Silica, some silicates, coal dust and para-Aramid fibrils*, IARC, Lyon, France, 1997, vol. 68.
4. K. Straif, L. Benbrahim-Tallaa, R. Baan, Y. Grosse, B. Secretan, F. El Ghissassi, V. Bouvard, N. Guha, C. Freeman, L. Galichet and V. Coglianò, *Lancet Oncol.* 2009, **10**, 453-454.
5. T. Driscoll, D. I. Nelson, K. Steenland, J. Leigh, M. Concha-Barrientos, M. Fingerhut and A. Prüss-Üstün, *Am J Ind Med.* 2005, **48**, 432-445.
6. S. Peters, R. Vermeulen, A. Olsson, R. Van Gelder, B. Kendzia, R. Vincent, B. Savary, N. Williams, T. Woldbæk, J. Lavoué, D. Cavallo, A. Cattaneo, D. Mirabelli, N. Plato, D. Dahmann, J. Fevotte, B. Pesch, T. Brüning, K. Straif and H. Kromhout, *Ann Occup Hyg.* 2011, DOI: 10.1093/annhyg/mer1081.
7. National Institute for Occupational Safety and Health, *Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica*, NIOSH, Cincinnati, OH, 2002, DHHS [NIOSH] Report no. 2002-129.
8. A. K. Madl, E. P. Donovan, S. H. Gaffney, M. A. McKinley, E. C. Moody, J. L. Henshaw and D. J. Paustenbach, *J Toxicol Environ Health B Crit Rev.* 2008, **11**, 548-608.

9. K. D. Linch and J. C. Cocalis, *Appl Occup Environ Hyg.* 1994, **9**, 539-542.
10. M. E. Flanagan, N. Seixas, P. Becker, B. Takacs and J. Camp, *J Occup Environ Hyg.* 2006, **3**, 144-152.
11. M. Moore, *Indoor Built Environ.* 1999, **8**, 82-88.
12. M. E. G. L. Lumens and T. Spee, *Ann Occup Hyg.* 2001, **45**, 585-595.
13. S. M. Rappaport, M. Goldberg, P. Susi and R. F. Herrick, *Ann Occup Hyg.* 2003, **47**, 111-122.
14. J. Chisholm, *Indoor Built Environ.* 1999, **8**, 94-106.
15. S. R. Woskie, A. Kalil, D. Bello and M. A. Virji, *Am Ind Hyg Assoc J.* 2002, **63**, 447 - 457.
16. D. J. Valiante, D. P. Schill, K. D. Rosenman and E. Socie, *Am J Public Health.* 2004, **94**, 876-880.
17. E. Tjoe Nij, D. Hohl, P. Borm, I. Burstyn, J. Spierings, F. Steffens, M. Lumens, T. Spee and D. Heederik, *J Occup Environ Hyg.* 2004, **1**, 191-198.
18. D. K. Verma, L. A. Kurtz, D. Sahai and M. M. Finkelstein, *Appl Occup Environ Hyg.* 2003, **18**, 1031-1047.
19. C. Beaudry, C. Dion, M. Gérin, J. Lavoué, D. Bégin, G. Perrault and M. Senhaji, Unpublished work.
20. A. Maciejewska, *Int J Occup Med Environ Health.* 2008, **21**, 1-23.
21. D. J. Paustenbach, *J Toxicol Environ Health Part B* 2000, **3**, 179-291.

22. P. Susi, M. Goldberg, P. Barnes and E. Stafford, *Appl Occup Environ Hyg.* 2000, **15**, 26 - 38.
23. M. Goldberg, S. M. Levin, J. T. Doucette and G. Griffin, *Am J Ind Med.* 1997, **31**, 310-318.
24. M. J. Kerr, L. Brosseau and C. S. Johnson, *Am Ind Hyg Assoc J.* 2002, **63**, 334 - 339.
25. C. A. Greenspan, R. Moure-Eraso, D. H. Wegman and L. C. Oliver, *Appl Occup Environ Hyg.* 1995, **10**, 50-58.
26. P. F. Scholz, B. L. Materna, D. Harrington and C. Uratsu, *Am Ind Hyg Assoc J.* 2002, **63**, 22-28.
27. I. Burstyn and K. Teschke, *Am Ind Hyg Assoc J.* 1999, **60**, 57-72.
28. M. A. Virji, S. R. Woskie and L. D. Pepper, *J Occup Environ Hyg.* 2009, **6**, 99-112.
29. Institut de Veille Sanitaire (InVS), *Banque de données d'une matrice emplois-expositions aux poussières alvéolaires de silice cristalline libre*, InVS, Département santé travail, Saint-Maurice, France, <http://www.invs.sante.fr/surveillance/index.htm>, accessed Jun 28, 2011.
30. P. Becker, M. E. Flanagan and M. Akladios, *Appl Occup Env Hyg.* 2001, **16**, 781-783.
31. J. Lavoué, D. Bégin, C. Beaudry and M. Gérin, *Ann Occup Hyg.* 2007, **51**, 161-172.
32. D. R. Helsel, *Nondetects and data analysis : statistics for censored environmental data*, Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, 2005.

33. K. P. Burnham and D. R. Anderson, *Model selection and multimodel inference : a practical information-theoretic approach*, 2nd edn., Springer, New York, 2002.
34. J. Lavoué and P. O. Droz, *Ann Occup Hyg.* 2009, **53**, 173-180.
35. A. E. Raftery, D. Madigan and J. A. Hoeting, *J Am Stat Assoc.* 1997, **92**, 179-191.
36. C. M. Hurvich and C.-L. Tsai, *Biometrika.* 1989, **76**, 297-307.
37. K. P. Burnham and D. R. Anderson, *Sociol Meth Res.* 2004, **33**, 261-304.
38. P. M. Lukacs, W. L. Thompson, W. L. Kendall, W. R. Gould, P. F. Doherty, K. P. Burnham and D. R. Anderson, *J Appl Ecol.* 2007, **44**, 456-460.
39. J. Tobin, *Econometrica.* 1958, **26**, 24-36.
40. J. H. Lubin, J. S. Colt, D. Camann, S. Davis, J. R. Cerhan, R. K. Severson, L. Bernstein and P. Hartge, *Environ Health Perspect.* 2004, **112**, 1691-1696.
41. B. Choodari-Oskoei, P. Royston and M. K. B. Parmar, *Stat Med.* 2011, DOI: 10.1038/ng1571.
42. R. W. Hornung and L. Reed, *Appl Occup Environ Hyg.* 1990, **5**, 46-51.
43. J. Lavoué, C. Beaudry, N. Goyer, G. Perrault and M. Gérin, *Ann Occup Hyg.* 2005, **49**, 587-602.
44. L. Lee, *NADA: Nondetects And Data Analysis for environmental data*, available at URL <http://CRAN.R-project.org/package=NADA>, accessed October 5, 2011.
45. L. Lee and D. Helsel, *Comput Geosci.* 2005, **31**, 1241-1248.

46. T. Therneau and T. Lumley, *survival: Survival analysis, including penalised likelihood*, available at URL <http://CRAN.R-project.org/package=survival>, accessed October 5, 2011.
47. M. J. Hein, M. A. Waters, A. M. Ruder, M. R. Stenzel, A. Blair and P. A. Stewart, *Ann Occup Hyg.* 2010, **54**, 459-472.
48. C. S. Berkey, D. C. Hoaglin, F. Mosteller and G. A. Colditz, *Stat Med.* 1995, **14**, 395-411.
49. M. J. Hein, M. A. Waters, E. van Wijngaarden, J. A. Deddens and P. A. Stewart, *J Occup Environ Hyg.* 2008, **5**, 36-47.
50. D. Park, P. A. Stewart and J. B. Coble, *Ann Occup Hyg.* 2009, **53**, 271-288.
51. J. Lavoué, R. Vincent and M. Gérin, *Ann Occup Hyg.* 2006, **50**, 305-321.
52. H. A. Kolstad, J. Sønderskov and I. Burstyn, *Ann Occup Hyg.* 2005, **49**, 155-165.
53. F. Akbar-Khanzadeh and R. L. Brillhart, *Ann Occup Hyg.* 2002, **46**, 341-346.
54. N. T. Nash and D. R. Williams, *Appl Occup Environ Hyg.* 2000, **15**, 8-10.
55. E. Symanski, L. L. Kupper and S. M. Rappaport, *Occup Environ Med.* 1998, **55**, 300-309.
56. H. Kromhout and R. Vermeulen, *Ann Occup Hyg.* 2000, **44**, 325-327.
57. J. Forest and C. Tremblay, *Bilan de l'étude environnementale de l'exposition au quartz chez certains travailleurs du secteur BTP*, Direction de santé publique, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal, Montréal, 2007, available at URL <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs47892>, accessed December 7, 2011.

58. F. Akbar-Khanzadeh, S. A. Milz, C. D. Wagner, M. S. Bisesi, A. L. Ames, S. Khuder, P. Susi and M. Akbar-Khanzadeh, *J Occup Environ Hyg.* 2010, **7**, 700-711.
59. D. Almaguer, S. Schulman and A. Echt, *Control technology for ready-mix truck drum cleaning*, National Institute of Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH, 2001, Report no. EPHB 247-19.
60. F. Akbar-Khanzadeh, S. Milz, A. Ames, P. P. Susi, M. Bisesi, S. A. Khuder and M. Akbar-Khanzadeh, *J Occup Environ Hyg.* 2007, **4**, 770-779.
61. G. A. Croteau, S. E. Guffey, M. E. Flanagan and N. S. Seixas, *Am Ind Hyg Assoc J.* 2002, **63**, 458-467.
62. S. Shepherd, S. R. Woskie, C. Holcroft and M. Ellenbecker, *J Occup Environ Hyg.* 2009, **6**, 42-51.
63. S. Yasui, P. Susi, M. McClean and M. Flynn, *Appl Occup Environ Hyg.* 2003, **18**, 977-984.
64. A. Echt, A. Garcia, S. Shulman, J. Colinet, A. Cecala, R. Carlo and J. Zimmer, *In-depth survey of dust control technology for asphalt milling at Northeast Asphalt, Inc., US Route 22 and SR 64 Projects, Wisconsin*, National Institute of Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH, 2007, Report no. EPHB 282-12a.
65. B. R. Beamer, S. Shulman, A. Maynard, D. Williams and D. Watkins, *Ann Occup Hyg.* 2005, **49**, 503-510.
66. M. R. Flynn and P. Susi, *Appl Occup Environ Hyg.* 2003, **18**, 268-277.
67. L. S. Gold, A. J. De Roos, M. Waters and P. Stewart, *J Occup Environ Hyg.* 2008, **5**, 807-839.

68. I. Burstyn, H. Kromhout and P. Boffetta, *Am Ind Hyg Assoc J.* 2000, **61**, 715 - 726.
69. M. M. Methner, *Appl Occup Environ Hyg.* 2000, **15**, 189-192.

CHAPITRE 5 : DISCUSSION GÉNÉRALE

Les deux analyses de la banque de données d'exposition ont permis d'identifier et de caractériser de multiples facteurs influant sur l'exposition à court et à long-terme sur les chantiers de construction. La comparaison des résultats obtenus à ceux d'autres études récentes portant sur l'exposition à la silice dans ce secteur est par compte complexe en vertu du fait que la plupart d'entre elles sont potentiellement contenues dans la banque de données. De plus, l'analyse de données d'exposition provenant de la littérature représente un défi particulier dont certains aspects sont abordés à la fin de ce chapitre.

5.1. Circonstances d'exposition couvertes par les deux analyses

Les 2912 mesures d'exposition à la silice contenues dans les deux sous-banques représentent approximativement le quart de la banque de données originale, qui inclut également des mesures de silice sous d'autres fractions (p.ex. totale, inhalable) et des poussières. Le nombre de mesures contenues dans les deux sous-banques compte pour plus du double de celle compilée par Flanagan et coll. (2006), portant également sur l'exposition à la silice sur les chantiers de construction avec une taille de 1374 mesures. Conséquemment, le nombre de catégories de titres d'emploi (10 contre 8) et de tâches (27 contre 16) évaluées étaient supérieures dans notre étude. Ces différences sont dues en partie à la plus grande période couverte par les deux sous-banques, entre 1988 et 2007 comparativement à 1992-2002, ainsi qu'à l'inclusion de données d'exposition provenant de pays autres que les États-Unis. La présence de données d'exposition communes avec l'étude réalisée par Flanagan et coll. était beaucoup plus élevée dans la banque Métiers (47%) que dans la banque Tâches (moins de 2%). La majorité des données recensées par Flanagan et coll. provenait d'organismes réglementaires américains contenant des résultats d'inspections réalisées sur différents chantiers afin d'évaluer la conformité à la valeur limite d'exposition. Ces données

sont donc plus représentatives de l'exposition sur un quart de travail car elles visent à comparer les niveaux relativement à une valeur limite sur 8 heures, expliquant ainsi leur proportion plus élevée dans la banque Métiers. Les données provenant de l'étude de Flanagan et coll. dans cette sous-banque représentent 631 des 644 mesures regroupées dans la catégorie « conformité » pour la variable de stratégie d'échantillonnage. Malgré les points en commun avec l'étude de Flanagan et coll., nos analyses ont permis de couvrir un plus grand nombre de circonstances associées à l'exposition à la silice sur les chantiers de construction. La distinction entre les stratégies d'échantillonnage a permis également d'estimer les niveaux en fonction des tâches réalisées sur l'exposition durant une journée de travail.

5.2. Simulation des expositions individuelles par la méthode de Monte-Carlo

L'analyse de la banque de données d'exposition à la silice représente la deuxième mise en application de la méthode permettant la reconstitution des valeurs d'expositions individuelles à partir de résultats présentés dans la littérature scientifique sous forme de paramètres de synthèse. Les données d'exposition au formaldéhyde recensées par Lavoué et coll. (2007) comportaient une part importante de concentrations simulées, soit 83% des mesures en ambiance et 92% des mesures en zone respiratoire. Ces proportions étaient plus faibles dans nos analyses avec 17% (titres d'emplois) et 70% (tâches). Les ÉTRs associés à l'estimation des moyennes géométriques étaient plus faibles dans l'analyse des titres d'emploi, avec un ÉTR de 1% pour la MG médiane sur l'ensemble des données comparativement à 3% pour les tâches. Cet écart était plus marqué entre les catégories de tâche et de titre d'emploi (en excluant les catégories contenant uniquement des mesures uniques) avec un ÉTR médian de 12% pour les tâches comparativement à 1% pour les titres d'emploi. Cette différence peut être due en partie à la proportion plus élevée de valeurs simulées pour les tâches, avec une médiane de

61% par catégorie comparativement à 17% pour les titres d'emploi. Les ÉTRs par catégorie demeurent néanmoins inférieurs à 20 pour la majorité des déterminants, ce qui est comparable aux résultats rapportés par Lavoué et coll. Les ÉTRs étaient toutefois légèrement plus élevés pour les paramètres de régression et ce, dans les deux analyses, avec des intervalles interquartiles de 3–16% pour les titres d'emploi et 7–18% pour les tâches. Nos résultats suggèrent donc que l'incertitude reliée à la méthode d'estimation des moyennes géométriques et paramètres de régression entre les itérations était relativement faible, comparativement aux autres sources de variabilité dans l'évaluation quantitative de l'exposition professionnelle.

Une différence notable avec l'analyse de l'exposition au formaldéhyde concerne le nombre plus faible de simulations effectuées dans nos analyses, soit 100 itérations comparativement à 1000 dans l'estimation des moyennes géométriques, et 20 pour la modélisation comparativement à 200. Cette diminution par un facteur de 10 s'explique entre autres par la faible variation dans les estimations entre les répliques rapportée par Lavoué et coll., et des ressources informatiques importantes requises pour l'approche multimodèle et les méthodes de traitement des valeurs non-détectées. La variabilité associée aux estimations dans nos analyses était toutefois comparable à celle rapportée par Lavoué et coll. malgré un nombre de répétitions plus faible de la procédure de simulation. De plus, une analyse de sensibilité effectuée dans l'analyse des tâches avec le modèle comportant toutes les variables et 1000 itérations a montré des différences minimales dans l'estimation des paramètres et des prédictions. Les résultats de nos analyses suggèrent donc que des estimations relativement précises peuvent être obtenues en utilisant un nombre modéré de répétitions.

5.3. Modélisation des données d'exposition

La modélisation des données d'exposition a généré de nombreux résultats dans les deux analyses de la banque de données. La présente section vient traiter de la qualité de l'ajustement des modèles et de l'application de la procédure d'inférence multimodèle. Les effets associés aux déterminants de l'exposition et les concentrations estimées en fonction des scénarios de prédictions seront abordées dans les deux sections suivantes.

La proportion de la variance expliquée par le modèle contenant toutes les variables et interactions dans l'analyse en fonction du quart de travail était de 22%, indiquant que le métier a une valeur prédictive relativement faible de l'exposition à la silice. Par contre, cette valeur était comparable à celles obtenues dans certaines autres analyses de banques de données d'exposition professionnelles, dont Flanagan et coll. (2006) et Lavoué et coll. (2008) avec 29% (pour les effets fixes dans l'étude de Lavoué et coll.). Dans le cas de l'analyse en fonction des tâches exécutées, le modèle contenant toutes les variables expliquait une part beaucoup plus importante de la variabilité des niveaux d'exposition avec une moyenne de 59%. Cette proportion est comparable à de nombreuses études recensées par Burstyn et Teschke (1999) et suggère que les facteurs associés à l'exposition sont relativement bien définis. La différence entre les coefficients de détermination obtenus entre les deux analyses indique que la nature de la tâche effectuée caractérise beaucoup mieux l'exposition que le titre d'emploi, en raison notamment du nombre de tâches différentes pouvant être associées aux différentes catégories de métiers. La stratégie d'évaluation par tâche permet de mieux cibler les actions de prévention – incluant l'utilisation de moyen de maîtrise des poussières à la source – à l'intérieur du quart de travail. Par contre, puisque les tâches exécutées peuvent varier entre les journées, l'évaluation en fonction du métier demeure une approche appropriée pour l'estimation de l'exposition à long terme sur les risques à la santé et à des fins de conformité aux valeurs limites.

L'importance relative des différents déterminants inclus dans les modèles était également différente entre les deux analyses. Dans le cas de l'analyse par quart de travail selon le métier, seules les variables de durée, année et stratégie d'échantillonnage, en plus du titre d'emploi, étaient fortement prédictives de l'exposition. De plus, aucun modèle candidat ne s'est démarqué comme étant beaucoup plus prédictif que les autres dans cette analyse; l'estimation des paramètres a donc été pondérée à partir de plusieurs modèles. Selon une approche de sélection de modèle séquentielle, le « meilleur » modèle sélectionné aurait potentiellement été celui ayant 24% de probabilité d'être le plus vraisemblable, éliminant entre autres la variable d'environnement. L'information sur l'effet de l'utilisation de moyens de maîtrise à l'intérieur ou à l'extérieur sur les niveaux d'exposition aurait ainsi été évacuée sans l'approche multi-modèle, ce qui démontre son utilité dans l'analyse des déterminants de l'exposition.

Contrairement à l'analyse en fonction du titre d'emploi, le modèle candidat contenant toutes les variables dans l'analyse des tâches avait un poids relatif de 100% et la totalité des variables d'exposition avaient de très fortes importances relatives. Les 159 autres modèles de l'ensemble ont donc eu un impact pratiquement nul sur l'estimation des effets des déterminants. Puisque les effets ont été estimés à partir d'une seule structure de modèle, l'approche multi-modèle n'a pas offert d'avantage particulier comparativement à une méthode de sélection plus traditionnelle. Les ressources informatiques nécessaires à l'ajustement des 160 modèles aux données auraient ainsi pu être dédiées à l'utilisation d'une seule structure de modèle et d'un plus grand nombre de répétitions afin de diminuer l'incertitude liée à la procédure de simulation. La modification de la méthodologie *post hoc* sur la base des résultats obtenus est toutefois contre-indiquée (Anderson 2008). Une analyse de sensibilité comprenant 1000 itérations et seulement le modèle contenant toutes les variables a tout de même été

effectuée, et a montré des résultats similaires à l'approche multimodèle avec 20 répétitions quant aux paramètres estimés et à la variabilité associée à la simulation.

5.4. Effets des déterminants de l'exposition

L'avantage majeur de l'analyse multivariée, comparativement aux statistiques univariées, est la possibilité de dissocier et de quantifier les effets des différents déterminants sur les niveaux d'exposition. Par exemple, une moyenne géométrique estimée pour une catégorie de tâche ne permet pas de prendre en considération l'effet combiné de la durée d'échantillonnage, de la présence ou non de moyens de maîtrise et des contextes différents dans lesquelles les mesures ont été prises. L'approche multivariée permet également de faire des prédictions en tenant compte des caractéristiques du milieu de travail et des autres déterminants à partir de leurs effets estimés.

Dans les deux analyses réalisées dans ce travail, l'effet de la durée d'échantillonnage était important, se traduisant par une diminution de l'ordre de 13% à 18% des niveaux d'exposition associée à une augmentation de 50% de la durée de prélèvement (par exemple de 20 à 30 minutes, ou de 4 à 6 heures). Les mesures associées à une durée plus longue peuvent inclure des périodes sans exposition, par exemple des pauses et des tâches ou procédés de nature secondaire (Kolstad et coll. 2005; Lavoué et coll. 2006), ce qui peut expliquer les tendances observées. Dans le cas de l'analyse des tâches exécutées, cette tendance peut être reliée aux différentes méthodes d'échantillonnage utilisées entre les sources de données pour évaluer l'exposition. Par exemple, le train d'échantillonnage utilisé dans une étude réalisée par Akbar-Khanzadeh et Brillhart (2002), dont certains résultats étaient contenus dans la banque Tâches, était doté d'un dispositif permettant de suspendre le prélèvement lors d'activités autres que le meulage de surfaces en béton. Cette méthode permet d'échantillonner uniquement durant les

périodes avec exposition, alors que certaines autres études présentes, dont celles de Nash et Williams (2000) et Croteau et coll. (2004), rapportaient la présence de périodes de pause au cours de l'évaluation. L'inclusion de la durée d'échantillonnage dans cette analyse permet également de tenir compte de la durée d'exécution différente selon la nature de la tâche réalisée dans l'estimation des niveaux d'exposition. Dans le cas de l'analyse en fonction du titre d'emploi, la tendance observée pourrait également être due à des considérations d'ordre analytique. Par exemple, la méthode 7500 du NIOSH requiert une masse de poussières sur le filtre inférieure à 2mg (NIOSH 2003); une durée d'échantillonnage plus courte peut donc être nécessaire lors de fortes expositions pour ne pas dépasser cette quantité. À l'opposé, une durée plus longue serait requise dans le cas d'expositions plus faibles pour prélever une quantité de matière suffisante pour obtenir un résultat supérieur à la limite de détection de la méthode d'analyse. Cette explication peut donc remettre en question la pertinence d'inclure la variable de durée dans la modélisation et dans les prédictions en fonction du titre d'emploi, puisque les échantillons ne couvrant qu'une partie de la journée pourraient être considérés comme représentatifs du quart de travail complet. Une analyse de sensibilité réalisée en excluant la variable de durée de la modélisation a résulté en des concentrations plus élevées pour tous les titres d'emploi à l'exception du foreur, avec une augmentation médiane de 30%. Les prédictions plus élevées sans la variable de durée ne changeaient toutefois pas le constat de surexposition chez les travailleurs des titres d'emploi évalués.

Les tendances temporelles liées à l'exposition à des contaminants en milieu de travail sont généralement à la baisse, selon deux méta-analyses (Symanski et coll. 1998; Creely et coll. 2006), et peuvent notamment être dues à une meilleure maîtrise des facteurs (p.ex. administratifs, économiques ou technologiques) associés à l'exposition (Kromhout et Vermeulen 2000). Cette tendance à la baisse a été observée pour l'évaluation des tâches

spécifiques, avec une diminution de 11% par année. Dans le cas des données portant sur le quart de travail, cette tendance était également présente pour les données provenant d'inspections, avec une baisse importante de 17% par année. Par contre, les données issues des autres stratégies visant à comparer l'exposition à une valeur limite montraient une augmentation de 7% par année. Cette tendance inverse se traduisait par des niveaux d'exposition plus élevés pour les données d'inspection au début de la période couverte, mais plus faible que les données provenant d'autres stratégies à la fin. Bien que l'évolution à la baisse dans le cas des données d'inspection puisse être due à la mise en place de mesures correctives suite à un avis de non-conformité, les informations disponibles dans la banque de données ne permettent pas d'identifier des mesures répétées dans le temps au sein d'une même entreprise ou d'un même chantier. La mise en commun de données d'exposition provenant de différentes sources semble être une explication plus probable des tendances différentes retrouvée dans nos analyses. La répartition de l'année de l'évaluation pour les différentes catégories de titres d'emploi, tâches et autres déterminants était inégale dans les deux sous-banques, ce qui peut donner lieu à des effets complexes à interpréter, comme ici. Ces différentes tendances peuvent également être liées à des facteurs qui ne sont pas documentés dans la banque de données et donc confondus en partie par l'effet de l'année. Les prédictions ont donc été réalisées en prenant la valeur médiane de l'année d'échantillonnage et, pour les titres d'emploi, en donnant une part égale aux deux stratégies d'échantillonnage afin de minimiser les effets des tendances temporelles sur les estimations.

Les effets reliés à la nature des chantiers de construction montrent que les projets de nouvelle construction sont associés à des niveaux d'exposition plus faibles que ceux de rénovation et de démolition. Il est probable que le degré de confinement soit plus faible pour les projets de nouvelle construction, avec une proportion plus importante d'activités réalisées

dans un environnement extérieur. En ce qui a trait au secteur d'activité, les chantiers résidentiels étaient associés à des niveaux d'exposition plus élevés dans les deux analyses, comparativement à la catégorie de référence Génie civil et voirie. Certaines particularités de ce secteur, notamment une proportion importante de travailleurs autonomes et/ou petites entreprises non-syndiquées, font que les ressources dédiées en santé et sécurité du travail sont relativement moindres que dans les autres secteurs (Mayhew et Quinlan 1997; Methner 2000; Darragh et coll. 2004) et peuvent expliquer en partie ces résultats.

Les méthodes employées pour l'évaluation des effets liés à l'environnement de travail et aux moyens de maîtrise différaient entre les deux analyses. L'utilisation de moyens de maîtrise dans l'analyse en fonction du titre d'emploi a été évaluée selon la présence ou l'absence, en raison du manque d'information sur le type employé pour une grande proportion des données d'exposition. Les effets observés allaient dans la direction anticipée avec des niveaux d'exposition plus élevés sans l'utilisation d'un moyen de maîtrise (incluant la ventilation générale) et dans un environnement intérieur. Le portrait est plus complexe pour l'analyse des tâches avec des écarts marqués entre l'extérieur et l'intérieur, et l'influence de la ventilation. Les niveaux d'exposition les plus faibles étaient reliés à l'environnement extérieur en présence du vent, soit la catégorie de référence, alors que l'absence de vent était associée à des concentrations 25 fois plus élevées. L'impact du vent sur l'exposition a également été relevé par l'étude de Forest et Tremblay (2007), avec une baisse de la moyenne arithmétique des concentrations en quartz respirable de 0.25 mg/m^3 à 0.05 mg/m^3 avec un vent de 30 km/h lors de l'utilisation de marteaux-piqueurs. Les travaux réalisés à l'intérieur étaient associés à des niveaux approximativement 10 fois plus élevés que la catégorie de référence, avec un faible effet de la ventilation générale. Compte tenu des contrastes importants observés dans les effets reliés à l'interaction entre l'environnement et la ventilation générale, nous avons donné

un part égale aux quatre combinaisons (extérieur/intérieur et avec/sans présence de courants d'air) dans le scénario de prédiction des niveaux d'exposition.

Tous les types de moyens de maîtrise présents dans la banque Tâches étaient associés à une diminution des niveaux d'exposition, en particulier la ventilation locale (-64%) et l'utilisation d'un procédé humide intégré à l'outil (-80%). Pour ces derniers, les effets estimés étaient légèrement plus faibles que dans les études – pour la plupart de devis expérimental – recensées par Beaudry et coll. (2011), qui dépassaient régulièrement 90% d'efficacité. Or, ces études impliquent souvent le contrôle des sources de variabilité pour ajuster certains paramètres (débit d'air/eau, étanchéité) et obtenir une efficacité maximale de ces dispositifs. Nos résultats indiquent donc que ces équipements demeurent très efficaces pour réduire les concentrations en silice respirable dans des conditions plus représentatives pour une variété de tâches.

La littérature indique que la sélection d'un moyen de maîtrise ne dépend pas uniquement de l'efficacité de celui-ci, et que d'autres facteurs doivent être pris en compte dont la compatibilité avec l'outil et la nature de la tâche effectuée. L'arrosage de la surface du matériau ou des poussières générées peut être contre-indiqué avec des outils électriques, et peut augmenter les risques de glissade, surtout lorsque la température est sous le point de congélation (Almaguer et coll. 2001; Croteau et coll. 2004; Meeker et coll. 2009). Certaines études ont par ailleurs relevé que les outils munis d'un système d'aspiration des poussières peuvent être plus lourds et encombrants et gêner le travail (Nash et Williams 2000; Yasui et coll. 2003). De plus, l'efficacité des systèmes d'aspiration peut dépendre de l'étanchéité du dispositif permettant la collecte des poussières (Flynn et Susi 2003). Pour les deux types de moyens de maîtrise, la formation des travailleurs à ces systèmes et leur entretien est primordiale pour assurer une réduction optimale des concentrations, par exemple le

changement des filtres sur les systèmes d'aspiration (Thorpe et coll. 1999). L'adoption de bonnes pratiques de travail et la substitution pour certains matériaux sont d'autres moyens non-techniques permettant de réduire les niveaux d'exposition (Beaudry et coll. 2011).

5.5. Analyse des niveaux d'exposition à la silice

Les fréquences de dépassement de la valeur sanitaire de l'ACGIH sur 8 heures étaient toutes supérieures au niveau d'acceptabilité de 5%, et ce, pour tous les titres d'emplois évalués. En supposant que les estimations sur le quart de travail soient effectivement représentatives de l'exposition moyenne chez les catégories de travailleurs évaluées, les risques à la santé respiratoire seraient donc potentiellement importants. Le constat de surexposition des travailleurs de la construction à la silice est cohérent avec les conclusions d'autres études (Rappaport et coll. 2003; Flanagan et coll. 2006) qui étaient basées sur le seuil précédent de l'ACGIH ($0,05 \text{ mg/m}^3$). Cette valeur a été jugée insuffisante en 2006 pour protéger la santé des travailleurs contre la silicose et le cancer du poumon (ACGIH 2010). Quant à la norme québécoise de $0,1 \text{ mg/m}^3$, une étude du Centre international de recherche sur le cancer a montré un risque excédentaire du cancer du poumon lié à la silice sur une durée de vie de 1,1 % à 1,7 % (Steenland et coll. 2001). Les fréquences de dépassement estimées de la valeur limite québécoise étaient toutefois égales ou supérieures à 50 % pour cinq titres d'emploi, indiquant une valeur d'exposition moyenne pondérée sur huit heures supérieure à la norme pour au moins un quart de travail sur deux. Les résultats indiquent donc que les niveaux d'exposition à la silice sur les chantiers de construction doivent être réduits afin de protéger la santé des travailleurs contre les maladies professionnelles, notamment par la mise en place de moyens de maîtrise à la source.

Les niveaux d'exposition estimés pour les tâches exécutées en fonction du scénario de prédiction développé étaient supérieurs à la valeur seuil de l'ACGIH pour près de la moitié d'entre elles, et à la norme québécoise pour 7 catégories. Il est toutefois important de noter que la comparaison à ces valeurs limites n'est valide que si ces tâches sont effectuées de façon continue sur une durée de 8 heures. Les estimations allaient pour la plupart dans la direction anticipée, avec les tâches telles que le décapage au jet de sable, le meulage de joints de brique/pierre et le forage de tunnels figurant parmi celles générant les plus fortes expositions. D'autre part, les niveaux prédits pour les activités de préparation des matériaux et le nettoyage étaient parmi les plus faibles. Bien que l'évaluation de l'exposition sur de courtes périodes est généralement déconseillée pour contrôler le risque de maladies chroniques liées à l'exposition professionnelle (Rappaport 1991), elle peut permettre une meilleure compréhension de la variabilité sur le quart de travail. Le modèle prédictif dans la seconde analyse permet d'estimer la contribution des différentes tâches réalisées durant la journée de travail en fonction de leur durée d'exécution et des autres facteurs associés à l'exposition. Ce modèle permet également d'estimer la réduction apportée par les différents types de moyens de maîtrise des poussières à la source pour les tâches générant des niveaux d'exposition élevés.

Certaines tâches évaluées sont reliées à un titre d'emploi en particulier selon les conventions collectives régissant le secteur de la construction en vigueur au Québec (Commission de la Construction du Québec 2010a, 2010b, 2010c, 2010d). Notons par exemple le meulage de joints de brique, pour le métier de briqueteur-maçon, et le forage de tunnels pour le travailleur souterrain. Les niveaux d'exposition élevés estimés pour ces tâches peuvent expliquer en grande partie les concentrations moyennes égales ou supérieures à la norme québécoise prédites pour un quart de 8 heures. Par ailleurs certains titres d'emploi sont associés à un large éventail de travaux, en particulier les occupations exclusives tels les

manœuvres pipelines, spécialisés et journaliers. Par exemple, le manœuvre pipeline peut effectuer autant le décapage par projection d'abrasif que le contrôle de circulation, deux tâches avec des niveaux d'exposition dramatiquement différents. Les 357 mesures pour le manœuvre spécialisé dans la banque Métiers représentent également 15 catégories de tâches dont 12 sont présentes dans la banque Tâches.

L'analyse en fonction des tâches permet donc d'identifier et d'estimer la contribution des tâches les plus problématiques sur le profil d'exposition et de favoriser la mise en place de mesures de contrôle pour diminuer les concentrations à des niveaux plus acceptables. Toutefois, l'inclusion des effets des deux types de moyens de maîtrise les plus efficaces (la ventilation par aspiration à la source et les procédés humides sur l'outil) dans le scénario de prédiction a montré que la réduction apportée sur l'exposition était insuffisante pour atteindre la valeur guide de l'ACGIH pour les tâches les plus polluantes dont le meulage de joints de brique et le forage de tunnels. Par ailleurs, toutes les études visant à évaluer l'efficacité des moyens de maîtrise revues par Beaudry et coll. (2011), concluaient que ces moyens n'assuraient pas le respect des valeurs limites d'exposition à la silice pour une durée de 8 heures. Le port d'appareils de protection respiratoire appropriés selon le *Guide des appareils de protection respiratoire utilisés au Québec*³ demeurerait donc nécessaire pour certaines tâches pour rencontrer les normes d'exposition. De plus, l'ajustement et l'entretien de ces appareils dans le cadre d'un programme de protection respiratoire sont des éléments essentiels pour maintenir une protection efficace afin de protéger la santé des travailleurs (ibid.).

³ <http://www.prot.resp.csst.qc.ca/index.shtml>

5.6. Limites de ce travail

5.6.1. Limites liées au manque de documentations des facteurs reliés à l'exposition

Un élément commun de ce travail avec l'étude de Flanagan et coll. (2006) concerne la proportion importante de valeurs manquantes pour certains déterminants-clés, dont l'utilisation de moyens de maîtrise, l'environnement de travail et le type de projet et chantier. Cette proportion s'élevait à approximativement 33% des données pour ces variables dans la banque Tâches, et 66% dans la banque Métiers. Or, l'exclusion des résultats contenant au moins un déterminant non-documenté aurait résulté en des sous-banques comprenant 409 mesures d'exposition pour les titres d'emploi, et 697 pour les tâches, ce qui aurait dramatiquement réduit le nombre de circonstances couvertes par ces deux analyses. L'importance des données manquantes dans l'analyse des titres d'emploi s'explique principalement par les mesures visant à évaluer la conformité réglementaire provenant des États-Unis dans l'analyse par quart de travail, dont la proportion d'informations manquantes pour les variables d'environnement, moyen de maîtrise et secteur d'activité était supérieure à 80% dans l'analyse de Flanagan et coll. Plusieurs auteurs ont relevé le manque de documentation des variables associées aux données d'inspection américaines, principalement regroupées dans la banque de données IMIS (Gomez 1997; Teschke et coll. 1999; Melville et Lippmann 2001). De plus, Gomez (2000) notait que les informations colligées dans cette banque de données ne visent pas à priori leur utilisation ultérieure dans les études épidémiologiques et analyses des déterminants de l'exposition, une situation également relevée par Lavoué (2006) concernant d'autres banques de données d'exposition. Des recommandations sur les informations accompagnant les mesures d'expositions dans les banques de données ont été formulées entre autres par Brederode et coll. (2001), Gomez

(1993), Harris (1995), Lippmann (1995), Rajan et coll. (1997) et un comité conjoint de l'AIHA⁴ et de l'ACGIH (1996) pour faciliter leur utilisation future à des fins de recherche. L'information permettant d'interpréter et de caractériser les niveaux d'exposition en milieu de travail peut également être déficiente dans les articles de publications scientifiques (Caldwell et coll. 2000; Bakke et coll. 2007; Pronk et coll. 2009).

La documentation plus rigoureuse des facteurs associés aux expositions suite aux recommandations de ces auteurs ne peut évidemment pas être étendue aux données d'exposition déjà consignées dans les articles publiés et les banques de données, et la problématique des informations manquantes demeure pour les études rétrospectives. L'imputation multiple, proposée par Rubin en 1978, est une méthode utilisée abondamment dans les sciences sociales, économiques et médicales pour surmonter cette difficulté (Schafer 1999). Cette démarche est conceptuellement similaire à la procédure de simulation Monte-Carlo utilisée dans les deux analyses pour les données d'exposition rapportées sous forme de paramètres de synthèse. La première des trois étapes décrites par Rubin (1996) consiste au départ à attribuer à chaque donnée manquante une série de valeurs plausibles générées aléatoirement à partir d'une distribution préalablement définie en fonction des autres déterminants documentés associés à un résultat. Cette partie revient à créer un ensemble de répliques de la banque de données avec des valeurs potentiellement différentes pour les données manquantes. Chaque réplique de la banque de données peut être analysée selon une méthode appropriée pour des ensembles de données complètes. Les résultats de chaque itération sont ensuite combinés pour l'estimation finale des paramètres, tout en tenant compte de l'incertitude liée à la procédure d'imputation entre les itérations. L'imputation multiple a

⁴ American Industrial Hygiene Association

été récemment appliquée dans le domaine de l'hygiène du travail dans le traitement des valeurs d'exposition non-détectées (Krishnamoorthy et coll. 2009), mais à notre connaissance, pas encore dans le traitement de la description manquante des facteurs reliés à l'exposition. Par contre, la compatibilité de cette approche pour l'analyse de la banque de donnée en parallèle avec la mise en œuvre de la méthode de simulation des valeurs d'exposition provenant de paramètres de synthèse reste à établir.

5.6.2. Limites liées à la représentativité et distribution des données d'exposition

Certains facteurs associés à l'exposition étaient sous-représentés malgré l'exhaustivité des circonstances documentées dans la banque de données. Par exemple, le métier de foreur était associé à la plus grande MG estimée sur 8 heures, mais sur la base de seulement 12 échantillons, ce qui limite l'interprétation de ce résultat. En outre, peu de mesures d'évaluation de tâches spécifiques provenaient du secteur résidentiel, un sous-groupe important mais relativement peu étudié, une situation également relevée par Methner (2000). De plus, certaines conditions de travail présentes dans les analyses ne sont peut-être pas représentatives de celles présentes sur la majorité des chantiers au Québec. En particulier, les données d'exposition chez les couvreurs provenaient d'études réalisées dans le sud-ouest des États-Unis lors de la réfection de toitures en plaques de béton, utilisées rarement au Québec (Beaudry et coll. 2011).

Le faible nombre de données d'exposition pour certaines circonstances explique en partie la répartition inégale des différentes catégories de déterminants qui a restreint le type d'analyse effectuée et les variables incluses dans le processus de modélisation. Ces variables incluent notamment le type d'outil et matériau, la présence de sources d'exposition secondaires ou la formation des travailleurs et l'instrument d'échantillonnage. Les types

d'outils et matériaux étaient trop fortement associés aux tâches et titres d'emploi et leur inclusion aurait causé des problèmes de collinéarité et ainsi limité l'interprétation des résultats. Le cassage et le perçage de pièces de maçonnerie étaient les seules tâches associées à une variété d'outils et/ou matériaux documentés avec une taille d'échantillon suffisante pour permettre leur analyse plus détaillée sur les niveaux d'exposition. Dans le cas de l'instrument d'échantillonnage, les différents types de cyclones étaient aussi fortement associés à certaines tâches et types d'emploi et n'ont pas été retenus dans les deux analyses.

Finalement, les données d'exposition provenant de la littérature et des banques de données gouvernementales sont récoltées sous différents motifs et ne représentent pas nécessairement un échantillon aléatoire et représentatif des populations à l'étude. Une analyse des biais potentiels associés aux sources de mesures d'exposition présentée par Lavoué (2006) révèle que ceux-ci peuvent notamment être liés à sélection des milieux de travail évalués et à la stratégie d'échantillonnage. Pour cette dernière, l'analyse séparée de l'évaluation par tâche spécifique et par quart de travail, et la distinction entre la stratégie de conformité réglementaire et les autres stratégies pour les mesures sur un quart de travail, ont permis de compenser en partie cette problématique. L'importance de la variable de stratégie dans cette analyse suggère une différence marquée entre les données provenant d'inspections et celles n'ayant pas une portée légale. Cette situation peut être due à l'approche préconisée par les inspecteurs américains qui tendraient à cibler les situations potentiellement hors-normes (Froines et coll. 1986; Yassin et coll. 2005) contrairement aux autres stratégies de mesure. Les moyennes d'exposition pour les titres d'emplois sur 8 heures ont donc été estimées en donnant une part égale aux effets liés aux deux stratégies d'échantillonnage.

L'utilisation de modèles linéaires mixtes avec la source de données comme effet aléatoire aurait également permis de prendre en considération la corrélation possible entre les mesures

d'exposition provenant d'une même source, qui peut être due notamment la à stratégie d'échantillonnage. Ce type de modèle permet de tenir compte de l'hétérogénéité dans les devis et conditions entre les études et est particulièrement indiqué dans les méta-analyses de résultats issus de la littérature (Berkey et coll. 1995; Thompson et Sharp 1999). Les sources de données étaient toutefois fortement associées à la stratégie pour l'analyse des titres d'emploi, et avec le type de moyen de maîtrise et le secteur d'activité dans le cas de l'analyse des tâches. Cette stratégie de modélisation a dû être abandonnée en raison de ces problèmes de corrélation, une situation similaire à celle rencontrée Hein et coll. (2008; 2010) dans l'analyse de deux banques de données d'exposition compilées à partir de la littérature. Il demeure néanmoins plausible que la mise en commun de données d'exposition provenant de différentes sources permette de compenser les biais liés à la sélection des entreprises et/ou travailleurs évalués et stratégies d'échantillonnage entre les études sur les niveaux estimés. L'utilisation de données d'exposition de la littérature permet non seulement de couvrir un plus grand nombre de circonstances, mais également d'obtenir une taille d'échantillon plus grande pour ces conditions de travail et donc moins sensible aux biais liés aux études prises individuellement.

5.7. Conclusion

Les opérations et conditions de travail changent continuellement d'un chantier de construction à l'autre, ce qui complique la démarche d'anticipation et de prévention des risques liés à l'exposition à la silice dans cette industrie. L'utilisation de données provenant de la littérature, malgré certaines limites, est une approche peu exigeante en termes de ressources qui permet de caractériser les facteurs associés à l'exposition dans de multiples circonstances.

Les données d'exposition préexistantes ont permis dans ce travail de développer des modèles prédictifs de l'exposition en fonction des titres d'emploi et des tâches exécutées en tenant compte des caractéristiques du milieu de travail. L'utilisation de l'inférence multimodèle a permis d'identifier les déterminants ayant le plus d'influence sur les niveaux d'exposition et de quantifier leurs effets. Nos résultats indiquent que la variabilité associée à l'estimation des moyennes géométriques et paramètres de régression, due à la méthode de Monte-Carlo permettant l'analyse combinée des résultats sous forme agrégée et uniques, est relativement faible et ce, en utilisant un nombre modéré de répétitions.

Les niveaux d'expositions moyens sur un quart de travail de 8 heures suggèrent que la majorité des travailleurs de cette industrie sont surexposés par rapport au seuil de l'ACGIH, et sont donc sujets à développer des maladies respiratoires à long terme. Les modèles développés à partir des mesures visant à évaluer l'exposition sur la base des tâches effectuées permettent de cibler les activités qui ont le plus grand impact sur les niveaux et de mettre en place des mesures de contrôle. Par contre, les moyens techniques de maîtrise des poussières à la source ne permettent pas nécessairement de réduire l'exposition à des niveaux acceptables pour les tâches les plus polluantes. Nos résultats indiquent que l'utilisation de la protection respiratoire appropriée demeure inévitable pour ces tâches afin de protéger les travailleurs contre les maladies professionnelles liées à la silice cristalline.

BIBLIOGRAPHIE

ACGIH. (2010) Silica, Crystalline - α -Quartz and Cristobalite. Dans ACGIH. Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances, 7th Ed. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

Agostini M, de Vocht F, van Tongeren M, Cherrie JW, Galea KS, Kromhout H. (2010) Exposure to rubber process dust and fume since 1970s in the United Kingdom; influence of origin of measurement data. *Journal of Environmental Monitoring* 12: 1170-1178.

Akbar-Khanzadeh F, Brillhart RL. (2002) Respirable Crystalline Silica Dust Exposure During Concrete Finishing (Grinding) Using Hand-held Grinders in the Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 46: 341-346.

Almaguer D, Schulman S, Echt A. (2001) Control technology for ready-mix truck drum cleaning. Report EPHB 247-19. Cincinnati OH: National Institute of Occupational Safety and Health, Division of Applied Research and Technology, Engineering and Physical Hazards Branch.

Anderson DR. (2008) Model based inference in the life sciences : a primer on evidence. New York, NY ; Londres, Royaume-Uni. Springer.

Augustin N, Sauerbrei W, Schumacher M. (2005) The practical utility of incorporating model selection uncertainty into prognostic models for survival data. *Statistical Modelling* 5: 95-118.

Bakke B, Stewart P, Eduard W. (2002) Determinants of Dust Exposure in Tunnel Construction Work. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 17: 783-796.

Bakke B, Stewart PA, Waters MA. (2007) Uses of and Exposure to Trichloroethylene in U.S. Industry: A Systematic Literature Review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 4: 375-390.

Beaudry C, Dion C, Gérin M, Perrault G, Bégin D, Lavoué J. (2011) Bilan et analyse de la littérature sur l'exposition des travailleurs de la construction à la silice cristalline. Rapport R-692. Montréal, QC: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

Becker P, Flanagan ME, Akladios M. (2001) Development of an ACGIH construction industry silica exposure database overview. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 781-783.

Berkey CS, Hoaglin DC, Mosteller F, Colditz GA. (1995) A random-effects regression model for meta-analysis. *Statistics in Medicine* 14: 395-411.

Bero LA, Jadad AR. (1997) How Consumers and Policymakers Can Use Systematic Reviews for Decision Making. *Annals of Internal Medicine* 127: 37-42.

Birk T, Guldner K, Mundt KA, Dahmann D, Adams RC, Parsons W. (2010) Quantitative crystalline silica exposure assessment for a historical cohort epidemiologic study in the German porcelain industry. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 7: 516-528.

Brederode D, Linker F, Marquart H, Pothuis J, Slijpen J, Timmermans H. (2001) Recording of Data of Individual Measurements of Occupational Exposure: Guideline of the Dutch Society of Occupational Hygiene (October 1999). *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 122-127.

Buckland ST, Burnham KP, Augustin NH. (1997) Model Selection: An Integral Part of Inference. *Biometrics* 53: 603-618.

Burdorf A. (2005) Identification of determinants of exposure: consequences for measurement and control strategies. *Occupational and Environmental Medicine* 62: 344-350.

Burkhart G, Schulte PA, Robinson C, Sieber WK, Vossen P, Ringen K. (1993) Job tasks, potential exposures, and health risks of laborers employed in the construction industry. *American Journal of Industrial Medicine* 24: 413-425.

Burnham KP, Anderson DR. (2002) Model selection and multimodel inference : a practical information-theoretic approach. 2nd Ed. New York, NY. Springer.

Burstyn I, Boffetta P, Burr GA, Cenni A, Knecht U, Sciarra G, Kromhout H. (2002) Validity of empirical models of exposure in asphalt paving. *Occupational and Environmental Medicine* 59: 620-624.

Burstyn I, Kromhout H, Cruise PJ, Brennan P. (2000a) Designing an International Industrial Hygiene Database of Exposures Among Workers in the Asphalt Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 44: 57-66.

Burstyn I, Kromhout H, Kauppinen T, Heikkila P, Boffetta P. (2000b) Statistical Modelling of the Determinants of Historical Exposure to Bitumen and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Among Paving Workers. *Annals of Occupational Hygiene* 44: 43-56.

Burstyn I, Teschke K. (1999) Studying the determinants of exposure: a review of methods. *American Industrial Hygiene Association Journal* 60: 57-72.

Caldwell DJ, Armstrong TW, Barone NJ, Suder JA, Evans MJ. (2000) Hydrocarbon Solvent Exposure Data: Compilation and Analysis of the Literature. *American Industrial Hygiene Association Journal* 61: 881-894.

Cherrie JW, Sewell C, Ritchie P, McIntosh C, Tickner J, Llewellyn D. (2001) Retrospective Collection of Exposure Data from Industry: Results from a Feasibility Study in the United Kingdom. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 144-148.

Chisholm J. (1999) Respirable Dust and Respirable Silica Concentrations from Construction Activities. *Indoor and Built Environment* 8: 94-106.

Choodari-Oskoei B, Royston P, Parmar MKB. (2011) A simulation study of predictive ability measures in a survival model I: Explained variation measures. *Statistics in Medicine*: Prépublication en ligne. doi: 10.1038/ng571.

CIRC. (1997) IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 68: Silica, some silicates, coal dust and para-Aramid fibrils. Lyon, France. Centre International de Recherche sur le Cancer, Organisation Mondiale de la Santé.

Commission de la Construction du Québec. (2010a) Convention collective du secteur commercial et institutionnel 2010-2013. Montréal, QC. Commission de la construction du Québec.

Commission de la Construction du Québec. (2010b) Convention collective du secteur génie civil et voirie 2010-2013. Montréal, QC. Commission de la construction du Québec.

Commission de la Construction du Québec. (2010c) Convention collective du secteur industriel 2010-2013. Montréal, QC. Commission de la construction du Québec.

Commission de la Construction du Québec. (2010d) Convention collective du secteur résidentiel 2010-2013. Montréal, QC. Commission de la construction du Québec.

Commission de la Construction du Québec. (2011) Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2010. Montréal, QC: Commission de la construction du Québec, Direction recherche et organisation.

http://www.ccq.org/Publications/Stats/StatistiquesHistoriques/StatistiquesHistoriques2010/~media/PDF/Recherche/StatistiquesHistoriques/2010/Stats_annuelles_2010.pdf.ashx?sc_lang=fr-CA&profil=Medias (Consulté le 14 octobre 2011.)

Creely KS, Van Tongeren M, While D, Soutar AJ, Tickner J, Agostini M, de Vocht F, Kromhout H, Graham M, Bolton A, Cowie H, Cherrie JW. (2006) Trends in Inhalation Exposure - Mid 1980s till present. Research Report 460. Norwich, Royaume-Uni: Health and Safety Executive.

Croteau GA, Flanagan ME, Camp J, Seixas NS. (2004) The Efficacy of Local Exhaust Ventilation for Controlling Dust Exposures During Concrete Surface Grinding. *Annals of Occupational Hygiene* 48: 509-518.

CSST. (2011) Plan d'action construction 2011. Québec, QC: Commission de la santé et de la sécurité du travail. http://www.csst.qc.ca/publications/900/dc_900_9119.htm (Consulté le 17 Octobre 2011)

Darragh AR, Stallones L, Bigelow PL, Keefe TJ. (2004) Effectiveness of the HomeSafe Pilot Program in reducing injury rates among residential construction workers, 1994–1998. *American Journal of Industrial Medicine* 45: 210-217.

Dement JM, Lipscomb H. (1999) Workers' Compensation Experience of North Carolina Residential Construction Workers, 1986-1994. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 14: 97-106.

Duguay P, Massicotte P. (2007) Décès indemnisés à la suite d'une lésion professionnelle : comparaison entre le Québec, l'Ontario et la Colombie-Britannique, 1997-2003. Rapport R-500. Montréal, QC: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

Egger M, Smith GD. (1997) Meta-analysis: Potentials and promise. *British Medical Journal* 315: 1371-1374.

Esmen NA, Hammad YY. (1977) Log-normality of environmental sampling data. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Environmental Science and Engineering* 12: 29-41.

Flanagan ME, Seixas N, Becker P, Takacs B, Camp J. (2006) Silica exposure on construction sites: results of an exposure monitoring data compilation project. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 3: 144-152.

Flynn MR, Susi P. (2003) Engineering Controls for Selected Silica and Dust Exposures in the Construction Industry – A Review. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 18: 268-277.

Forest J, Tremblay C. (2007) Bilan de l'étude environnementale de l'exposition au quartz chez certains travailleurs du secteur BTP. Montréal, QC. Direction de santé publique, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal.

Disponible au: <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/bs47892> (Consulté le 7 Décembre 2011)

Froines JR, Wegman DH, Dellenbaugh CA. (1986) An approach to the characterization of silica exposure in U.S. industry. *American Journal of Industrial Medicine* 10: 345-361.

Gomez MR. (1993) A Proposal to Develop a National Occupational Exposure Databank. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 8: 768-774.

Gomez MR. (1997) Factors associated with exposure in Occupational Safety and Health Administration data. *American Industrial Hygiene Association Journal* 58: 186-195.

Gomez MR. (2000) Exposure Assessment Must Stop Being Local. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 15: 15-20.

Görner P, Wrobel R, Mička V, Škoda V, Denis J, Fabriès J-F. (2001) Study of fifteen respirable aerosol samplers used in occupational hygiene. *Annals of Occupational Hygiene* 45: 43-54.

Gouvernement du Québec. (2011). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail, c. S-2.1, r.19.01*. Québec, QC: Éditeur officiel du Québec.

Hallin N. (1983) Occurrence of quartz in the construction sector; an investigation of the occurrence of quartz dust in connection with various operations in the construction sector. Stockholm, Suède: Bygghälsan.

Harris RL. (1995) Guideline for Collection of Industrial Hygiene Exposure Assessment Data for Epidemiologic Use. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 10: 311-316.

Hein MJ, Waters MA, Ruder AM, Stenzel MR, Blair A, Stewart PA. (2010) Statistical modeling of occupational chlorinated solvent exposures for case-control studies using a literature-based database. *Annals of Occupational Hygiene* 54: 459-472.

Hein MJ, Waters MA, van Wijngaarden E, Deddens JA, Stewart PA. (2008) Issues when modeling benzene, toluene, and xylene exposures using a literature database. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 5: 36-47.

Helsel DR. (2005) *Nondetects and data analysis : statistics for censored environmental data*. Hoboken, NJ. Wiley-Interscience.

Hobbs NT, Hilborn R. (2006) Alternatives to statistical hypothesis testing in ecology: a guide to self teaching. *Ecological applications* 16: 5-19.

Hornung RW, Reed L. (1990) Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 5: 46-51.

Huang X, Hinze J. (2003) Analysis of Construction Worker Fall Accidents. *Journal of Construction Engineering & Management* 129: 262-271.

Hurvich CM, Tsai C-L. (1989) Regression and time series model selection in small samples.

Biometrika 76: 297-307.

INRS. (2005) Fiche Métropol A1: Stratégie d'évaluation de l'exposition et comparaison aux valeurs limites. Vandoeuvre, France. Institut National de Recherche et Sécurité. Disponible au: <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/metropol.html>. (Consulté le 2 décembre 2011).

Institut de la statistique du Québec. (2010) Principaux indicateurs de l'activité économique de l'industrie de la construction, Québec, 1999-2008. Direction des statistiques économiques et du développement durable Québec (QC).

http://www.stat.gouv.qc.ca/publications/referenc/quebec_stat/eco_con/eco_con_1.htm

(Consulté le 2 Novembre 2011)

InVS. (2008) Banque de données d'une matrice emplois-expositions aux poussières alvéolaires de silice cristalline libre. Institut de veille sanitaire, Département santé travail, Saint-Maurice, France. <http://www.invs.sante.fr/surveillance/index.htm> (Consulté le 28 Juin 2011)

Joint ACGIH-AIHA Task Group on Occupational Exposure Databases. (1996) Special Report: Data Elements for Occupational Exposure Databases: Guidelines and Recommendations for Airborne Hazards and Noise. Applied Occupational and Environmental Hygiene 11: 1294-1311.

Kauffer E, Vincent R. (2007) Occupational Exposure to Mineral Fibres: Analysis of Results Stored on Colchic Database. *Annals of Occupational Hygiene* 51: 131-142.

Kolstad HA, Sønderskov J, Burstyn I. (2005) Company-Level, Semi-Quantitative Assessment of Occupational Styrene Exposure when Individual Data are not Available. *Annals of Occupational Hygiene* 49: 155-165.

Krishnamoorthy K, Mallick A, Mathew T. (2009) Model-Based Imputation Approach for Data Analysis in the Presence of Non-detects. *Annals of Occupational Hygiene* 53: 249-263.

Kromhout H, Symanski E, Rappaport SM. (1993) A comprehensive evaluation of within- and between-worker components of occupational exposure to chemical agents. *Annals of Occupational Hygiene* 37: 253-270.

Kromhout H, Vermeulen R. (2000) Long-term trends in occupational exposure: Are they real? What causes them? What shall we do with them? *Annals of Occupational Hygiene* 44: 325-327.

Kutner MH, Nachtsheim C, Neter J, Li W. (2005) *Applied linear statistical models*. 5th Ed. Boston, MA ; Montreal, QC. McGraw-Hill Irwin.

Lavender MD. (1999) The Importance of Silica to the Modern World. *Indoor and Built Environment* 8: 89-93.

Lavoué J. (2006) Évaluation de l'exposition professionnelle au formaldéhyde à partir de sources de données préexistantes. Thèse doctorale. Montréal, QC: Université de Montréal.

Lavoué J, Beaudry C, Goyer N, Perrault G, Gérin M. (2005) Investigation of Determinants of Past and Current Exposures to Formaldehyde in the Reconstituted Wood Panel Industry in Quebec. *Annals of Occupational Hygiene* 49: 587-602.

Lavoué J, Bégin D, Beaudry C, Gérin M. (2007) Monte Carlo Simulation to Reconstruct Formaldehyde Exposure Levels from Summary Parameters Reported in the Literature. *Annals of Occupational Hygiene* 51: 161-172.

Lavoué J, Droz PO. (2009) Multimodel Inference and Multimodel Averaging in Empirical Modeling of Occupational Exposure Levels. *Annals of Occupational Hygiene* 53: 173-180.

Lavoué J, Gérin M, Vincent R. (2011) Comparison of Formaldehyde Exposure Levels in Two Multi-Industry Occupational Exposure Databanks Using Multimodel Inference. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 8: 38-48.

Lavoué J, Vincent R, Gérin M. (2006) Statistical Modelling of Formaldehyde Occupational Exposure Levels in French Industries, 1986-2003. *Annals of Occupational Hygiene* 50: 305-321.

Lavoué J, Vincent R, Gérin M. (2008) Formaldehyde Exposure in U.S. Industries from OSHA Air Sampling Data. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 5: 575-587.

Lee L. (2010) NADA: Nondetects And Data Analysis for environmental data. R package version 1.5-3. Disponible au: <http://CRAN.R-project.org/package=NADA>. (Consulté le 5 octobre 2011)

Lee T, Kim SW, Chisholm WP, Slaven J, Harper M. (2010) Performance of high flow rate samplers for respirable particle collection. *Ann Occup Hyg* 54: 697-709.

Leidel NA, Busch KA, Lynch JR. (1977) Occupational exposure sampling strategy manual. Cincinnati, OH. Department of Health, Education, and Welfare; National Institute for Occupational Safety and Health.

Linch KD, Cocalis JC. (1994) An emerging issue: Silicosis prevention in construction. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 9: 539-542.

Lippmann M. (1995) Exposure Data Needs in Risk Assessment and Risk Management: Database Information Needs. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 10: 244-250.

Lippmann M. (2001) Size-Selective Health Hazard Sampling. Dans Cohen BS, McCammon CS. Air sampling instruments for evaluation of atmospheric contaminants. 9th. Cincinnati, OH: ACGIH Worldwide.

Lofgren D. (1993) Silica Exposure for Concrete Workers and Masons. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 8: 832-836.

Long WM. (1953) Airborne dust in coal mines: the sampling problem. *British journal of industrial medicine* 10: 241-244.

Lukacs PM, Thompson WL, Kendall WL, Gould WR, Doherty PF, Burnham KP, Anderson DR. (2007) Concerns regarding a call for pluralism of information theory and hypothesis testing. *Journal of Applied Ecology* 44: 456-460.

Lumens MEGL, Spee T. (2001) Determinants of Exposure to Respirable Quartz Dust in the Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 45: 585-595.

Maciejewska A. (2008) Occupational exposure assessment for crystalline silica dust: approach in Poland and worldwide. *International Journal of Occupational and Environmental Health* 21: 1-23.

Madl AK, Donovan EP, Gaffney SH, McKinley MA, Moody EC, Henshaw JL, Paustenbach DJ. (2008) State-of-the-science review of the occupational health hazards of crystalline silica in abrasive blasting operations and related requirements for respiratory protection. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B: Critical Reviews* 11: 548-608.

Marquart H, van Drooge H, Groenewold M, van Hemmen J. (2001) Assessing reasonable worst-case full-shift exposure levels from data of variable quality. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 210-217.

Mayhew C, Quinlan M. (1997) Subcontracting and occupational health and safety in the residential building industry. *Industrial Relations Journal* 28: 192-205.

Meeker JD, Cooper MR, Lefkowitz D, Susi P. (2009) Engineering control technologies to reduce occupational silica exposures in masonry cutting and tuckpointing. *Public Health Reports* 124 Suppl. 1: 101-111.

Meijster T, Tielemans E, Heederik D. (2009) Effect of an intervention aimed at reducing the risk of allergic respiratory disease in bakers: change in flour dust and fungal alpha-amylase levels. *Occupational and Environmental Medicine* 66: 543-549.

Melville R, Lippmann M. (2001) Influence of Data Elements in OSHA Air Sampling Database on Occupational Exposure Levels. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 884 - 899.

Methner MM. (2000) Identification of Potential Hazards Associated with New Residential Construction. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 15: 189-192.

Moore M. (1999) Crystalline silica: Occurrence and use. *Indoor and Built Environment* 8: 82-88.

Nash NT, Williams DR. (2000) Occupational Exposure to Crystalline Silica During Tuck-Pointing and the Use of Engineering Controls. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 15: 8-10.

Nikpour M, Stevens WM, Herrick AL, Proudman SM. (2010) Epidemiology of systemic sclerosis. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology* 24: 857-869.

NIOSH. (2002) Health Effects of Occupational Exposure to Respirable Crystalline Silica. Report no. 2002-129. Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati, OH.

NIOSH. (2003) Method 7500: Silica, crystalline, by XRD (filter redeposition). Dans Schlecht PC, O'Connor PF. NIOSH manual of analytical methods, 4th Ed, 3rd Suppl. Publication 2003-154. Cincinnati, OH: Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health.

Normand S-LT. (1999) Meta-analysis: formulating, evaluating, combining, and reporting. *Statistics in Medicine* 18: 321-359.

Oliver JE, Silman AJ. (2006) Risk factors for the development of rheumatoid arthritis. *Scandinavian Journal of Rheumatology* 35: 169-174.

Park D, Stewart PA, Coble JB. (2009) Determinants of exposure to metalworking fluid aerosols: a literature review and analysis of reported measurements. *Annals of Occupational Hygiene* 53: 271-288.

Parks CG, Cooper GS. (2006) Occupational exposures and risk of systemic lupus erythematosus: a review of the evidence and exposure assessment methods in population-and clinic-based studies. *Lupus* 15: 728-736.

Peters C, Demers P, Nicol A-M, Chow Y, Lang B, Hall A, Poplawski K, Ge C. (2010) Carex Canada Workplace Exposure Surveillance Report – Occupational exposure to selected priority carcinogens in Québec. Vancouver, BC: School of Environmental Health, University of British Columbia

Peters S, Vermeulen R, Olsson A, Van Gelder R, Kendzia B, Vincent R, Savary B, Williams N, Woldbæk T, Lavoué J, Cavallo D, Cattaneo A, Mirabelli D, Plato N, Dahmann D, Fevotte J, Pesch B, Brüning T, Straif K, Kromhout H. (2011a) Development of an Exposure Measurement Database on Five Lung Carcinogens (ExpoSYN) for Quantitative Retrospective Occupational Exposure Assessment. *Annals of Occupational Hygiene*: Prépublication en ligne. doi: 10.1093/annhyg/mer081.

Peters S, Vermeulen R, Portengen L, Olsson A, Kendzia B, Vincent R, Savary B, Lavoué J, Cavallo D, Cattaneo A, Mirabelli D, Plato N, Fevotte J, Pesch B, Bruning T, Straif K, Kromhout H. (2011b) Modelling of occupational respirable crystalline silica exposure for quantitative exposure assessment in community-based case-control studies. *Journal of Environmental Monitoring* 13: 3262-3268.

Pronk A, Coble J, Stewart PA. (2009) Occupational exposure to diesel engine exhaust: A literature review. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 19: 443-457.

R Development Core Team. (2011) R: A language and environment for statistical computing. Vienne, Autriche: R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>. (Consulté le 15 décembre 2011)

Raftery AE, Madigan D, Hoeting JA. (1997) Bayesian Model Averaging for Linear Regression Models. *Journal of the American Statistical Association* 92: 179-191.

Rajan B, Alesbury R, Carton B, Gérin M, Litske H, Marquart H, Olsen E, Scheffers T, Stamm R, Woldbaek T. (1997) European Proposal for Core Information for the Storage and Exchange of Workplace Exposure Measurements on Chemical Agents. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 12: 31-39.

Rappaport SM. (1984) The rules of the game: An analysis of OSHA's enforcement strategy. *American Journal of Industrial Medicine* 6: 291-303.

Rappaport SM. (1991) Assessment of long-term exposures to toxic substances in air. *Annals of Occupational Hygiene* 35: 61-122.

Rappaport SM, Goldberg M, Susi P, Herrick RF. (2003) Excessive Exposure to Silica in the US Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 47: 111-122.

Rappaport SM, Kromhout H, Symanski E. (1993) Variation of exposure between workers in homogeneous exposure groups. *American Industrial Hygiene Association Journal* 54: 654-662.

Ratney RS. (2000) Assessment of Exposure to Respirable Dusts. Dans Patty FA, Harris RL, Ayer HE. *Patty's Industrial Hygiene*. 4th Ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Rimal B, Greenberg AK, Rom WN. (2005) Basic pathogenetic mechanisms in silicosis: current understanding. *Current Opinion in Pulmonary Medicine* 11: 169-173.

Ringen K, Seegal J, England A. (1995) Safety and Health in the Construction Industry. *Annual Review of Public Health* 16: 165-188.

Rubin DB. (1996) Multiple Imputation After 18+ Years. *Journal of the American Statistical Association* 91: 473-489.

Rushton L. (2007) Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Occupational Exposure to Silica. *Reviews on Environmental Health* 22: 255-272.

Rushton L, Betts DS. (2001) Exposure Information in European Industry: Implications for Future Occupational Research. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 178-181.

Scarselli A, Binazzi A, Di Marzio D. (2011) Occupational exposure levels to benzene in Italy: findings from a national database. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 84: 617-625.

Schafer JL. (1999) Multiple imputation: a primer. *Statistical Methods in Medical Research* 8: 3-15.

Stamm R. (2001) MEGA-Database: One Million Data Since 1972. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 159-163.

Steenland K, Mannetje A, Boffetta P, Stayner L, Attfield M, Chen J, Dosemeci M, DeKlerk N, Hnizdo E, Koskela R, 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 and Control* 12: 773-784.

Stellman SD. (2003) Issues of causality in the history of occupational epidemiology. *Sozial- und Präventivmedizin/Social and Preventive Medicine* 48: 151-160.

Stewart PA, Rice C. (1990) A Source of Exposure Data for Occupational Epidemiology Studies. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 5: 359-363.

Straif K, Benbrahim-Tallaa L, Baan R, Grosse Y, Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Guha N, Freeman C, Galichet L, Cogliano V. (2009) A review of human carcinogens--part C: metals, arsenic, dusts, and fibres. *The Lancet Oncology* 10: 453-454.

Susi P, Goldberg M, Barnes P, Stafford E. (2000) The Use of a Task-Based Exposure Assessment Model (T-BEAM) for Assessment of Metal Fume Exposures During Welding and Thermal Cutting. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 15: 26-38.

Susi P, Schneider S. (1995) Database Needs for a Task-Based Exposure Assessment Model for Construction. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 10: 394-399.

Symanski E, Kupper LL, Hertz-Picciotto I, Rappaport SM. (1998) Comprehensive evaluation of long-term trends in occupational exposure: Part 2. Predictive models for declining exposures. *Occupational and Environmental Medicine* 55: 310-316.

Teschke K, Marion SA, Vaughan TL, Morgan MS, Camp J. (1999) Exposures to wood dust in U.S. industries and occupations, 1979 to 1997. *American Journal of Industrial Medicine* 35: 581-589.

Teschke K, Olshan AF, Daniels JL, De Roos AJ, Parks CG, Schulz M, Vaughan TL. (2002) Occupational exposure assessment in case-control studies: opportunities for improvement. *Occupational and Environmental Medicine* 59: 575-594.

Therneau T, Lumley T. (2011) survival: Survival analysis, including penalised likelihood. R package version 2.36-10. Disponible au: <http://CRAN.R-project.org/package=survival>. (Consulté le 5 octobre 2011).

Thompson SG, Sharp SJ. (1999) Explaining heterogeneity in meta-analysis: a comparison of methods. *Statistics in Medicine* 18: 2693-2708.

Thorpe A, Ritchie AS, Gibson MJ, Brown RC. (1999) Measurements of the Effectiveness of Dust Control on Cut-off saws Used in the Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 43: 443-456.

Tibbetts J. (2002) Under construction: building a safer industry. *Environmental Health Perspectives* 110: A134-141.

Tielemans E, Marquart H, De Cock J, Groenewold M, Van Hemmen J. (2002) A Proposal for Evaluation of Exposure Data. *Annals of Occupational Hygiene* 46: 287-297.

Tjoe-Nij E, Borm P, Höhr D, Heederik D. (2002) Pneumoconiosis and Exposure to Quartz-Containing Dust in the Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene* 46: 71-76.

Tobin J. (1958) Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables. *Econometrica* 26: 24-36.

Valiante DJ, Schill DP, Rosenman KD, Socie E. (2004) Highway Repair: A New Silicosis Threat. *American Journal of Public Health* 94: 876-880.

Verma DK, Kurtz LA, Sahai D, Finkelstein MM. (2003) Current chemical exposures among Ontario construction workers. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 18: 1031-1047.

Vincent JH. (2007) *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*. Chichester, West Sussex, Royaume-Uni. John Wiley & Sons, Ltd.

Vincent R, Jeandel B. (2001) COLCHIC - Occupational Exposure to Chemical Agents Database: Current Content and Development Perspectives. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16: 115-121.

Vittinghoff E, Glidden DV, Shiboski SC, McCulloch CE. (2005) Regression methods in biostatistics: linear, logistic, survival, and repeated measures models. New York. Springer.

Wambach PF. (2002) Variation in Exposure Levels for High Hazard Frequently Monitored Agents. American Industrial Hygiene Association Journal 63: 424-429.

Woskie SR, Kalil A, Bello D, Virji MA. (2002) Exposures to Quartz, Diesel, Dust, and Welding Fumes During Heavy and Highway Construction. American Industrial Hygiene Association Journal 63: 447-457.

Yassin A, Yebesi F, Tingle R. (2005) Occupational exposure to crystalline silica dust in the United States, 1988-2003. Environmental Health Perspectives 113: 255-260.

Yasui S, Susi P, McClean M, Flynn M. (2003) Assessment of Silica Exposure and Engineering Controls During Tuckpointing. Applied Occupational and Environmental Hygiene 18: 977-984.