

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-772



Exposition des travailleurs de la construction à la silice cristalline

Exploitation d'une banque de données tirée de la littérature

*Jean-François Sauvé
Charles Beaudry
Denis Bégin
Chantal Dion
Michel Gérin
Jérôme Lavoué*



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

NOS RECHERCHES *travaillent pour vous !*

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2013
ISBN : 978-2-89631-661-8 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2013



Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-772

Exposition des travailleurs de la construction à la silice cristalline Exploitation d'une banque de données tirée de la littérature

Avis de non-responsabilité

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

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

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

*¹Département de santé environnementale et santé au travail,
Université de Montréal*

²Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

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 temporaire des chantiers.

Dans le but d’améliorer les connaissances sur les conditions de travail pouvant exposer les travailleurs de la construction à la silice et de répondre à une demande initiale de la CSST, une équipe conjointe de l’Université de Montréal et de l’IRSST a monté une banque de données d’exposition professionnelle à ce contaminant à partir de la littérature. Ce premier projet a été financé par l’IRSST et a fait l’objet d’un rapport publié en 2011 par cet organisme. La banque de données contient plus de 10 000 mesures d’exposition provenant de périodiques scientifiques, de banques de données externes et de rapports d’organismes de recherche collectés à la suite d’une revue exhaustive de la littérature portant sur les 25 dernières années. Des analyses descriptives réalisées à partir des mesures quantitatives de la banque ont permis d’identifier les métiers et les tâches associées aux plus fortes expositions. Les chercheurs ont néanmoins souligné le potentiel important d’information additionnelle associé à l’emploi de techniques d’analyse multivariée, permettant d’évaluer l’influence simultanée de plusieurs variables sur les niveaux d’exposition. Le présent projet avait pour objectif principal d’approfondir l’exploitation de la banque de données afin de raffiner le portrait des expositions à la silice cristalline et d’estimer la contribution des différents déterminants de l’exposition.

Les données d’exposition à la silice cristalline ont d’abord été sélectionnées en fonction de la stratégie d’échantillonnage, résultant en deux analyses complémentaires ayant pour objectif d’estimer les niveaux d’exposition relativement aux valeurs limites d’exposition (VLE) sur huit heures en fonction du titre d’emploi, et de la tâche selon leur durée d’exécution. La méthode de Monte Carlo a été utilisée pour recréer les échantillons provenant de données rapportées sous forme de paramètres de synthèse (p. ex. moyenne et écart-type géométriques, moyenne arithmétique, fourchette), permettant leur analyse combinée avec les résultats rapportés sous forme de mesures uniques. Des modèles statistiques comprenant les variables tels le titre d’emploi, la tâche exécutée, la durée de mesure, l’année et la stratégie d’échantillonnage, le type de projet (démolition, nouvelle construction et rénovation), le secteur d’activité (p. ex. génie civil, résidentiel), l’environnement (extérieur, intérieur) et les moyens de maîtrise ont été développés et interprétés par inférence multimodèle. Ces analyses ont également été effectuées pour les échantillons en poussières respirables afin d’évaluer la présence d’effets potentiellement différents des déterminants de l’exposition. Par ailleurs, le croisement des données en silice cristalline et en poussières respirables a permis d’évaluer les différences entre les pourcentages en silice cristalline dans les échantillons aériens par titre d’emploi, tâche, outil, matériau et moyen de maîtrise à la source.

L’analyse des données en silice cristalline visant la comparaison à une VLE a été réalisée à partir de 1346 mesures couvrant 11 catégories de titre d’emploi. Le modèle contenant toutes les variables a expliqué 22 % de la variabilité des mesures tandis que l’année et la stratégie d’échantillonnage (conformité réglementaire vs surveillance) étaient les variables ayant le plus

d'influence sur l'exposition. L'augmentation de la durée d'échantillonnage était associée à des niveaux plus faibles, tandis que les tendances temporelles par stratégie allaient dans des directions contraires avec une diminution de 17 % par an (conformité réglementaire) comparativement à une augmentation de 9 % par an (surveillance). L'utilisation de moyens de maîtrise (sans égard au type spécifique) 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 huit heures étaient retrouvées chez les foreurs ($0,24 \text{ mg/m}^3$), les travailleurs souterrains ($0,22 \text{ mg/m}^3$), les couvreurs œuvrant sur des toitures en plaques de béton ($0,15 \text{ mg/m}^3$) et les cimentiers-applicateurs ($0,13 \text{ mg/m}^3$). Les effets des déterminants pour les poussières respirables, estimés à partir de 1137 mesures, étaient comparables à ceux pour la silice cristalline; l'accord entre les moyennes géométriques prédites pour les deux types de contaminant était toutefois modéré (coefficient de corrélation de Spearman de 0,45).

Pour l'analyse des niveaux associés aux tâches, 1466 mesures de silice cristalline réparties en 27 catégories de tâches ont été sélectionnées. Le modèle contenant toutes les variables a expliqué 60 % des variations des niveaux d'exposition, et l'ensemble des variables contextuelles étaient fortement prédictives. Les moyennes géométriques prédites pour l'année 1998, selon la durée médiane par tâche, étaient plus élevées lors du bouchardage du béton ($0,73 \text{ mg/m}^3$), du cassage de pièces de maçonnerie avec outils multiples (incluant marteaux perforateurs/piqueurs) ($0,59 \text{ mg/m}^3$), du forage de tunnels ($0,27 \text{ mg/m}^3$), du décapage par projection d'abrasif ($0,19 \text{ mg/m}^3$) et du meulage de joints de brique ($0,19 \text{ mg/m}^3$). Une diminution importante des concentrations a été observée avec les systèmes d'arrosage (71 %) et d'aspiration des poussières (69 %) intégrés aux outils. Pour les poussières respirables (1566 mesures), les taux d'efficacité des moyens de maîtrise étaient généralement plus élevés avec des réductions de 88 % et 81 % de l'exposition pour ces mêmes catégories. L'accord entre les prédictions pour les deux contaminants était également plus élevé avec un coefficient de corrélation de Spearman de 0,70.

Le pourcentage médian en silice cristalline respirable, calculé à partir de 924 échantillons, était de 11 %. La majorité des pourcentages par catégorie de titre d'emploi, tâche, outil, matériau et moyen de maîtrise à la source étaient entre 6 % et 16 %, la valeur la plus élevée (19 %) étant retrouvée pour la catégorie de matériau « sable ».

L'analyse des données a montré une surexposition généralisée par rapport à la VLE de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) et à la norme québécoise, indiquant un risque à long terme de maladies professionnelles pour tous les titres d'emploi à l'étude. 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 un meilleur ciblage des priorités d'intervention pour contrôler les niveaux d'exposition à la silice cristalline sur les chantiers de construction durant un quart de travail.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	I
ACRONYMES ET SIGLES	IX
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Banque de données québécoise d’exposition professionnelle à la silice dans le secteur du BTP (projet IRSST 0099-7530)	2
1.3 Objectifs.....	3
2. MÉTHODOLOGIE.....	4
2.1 Préparation de la banque de données d’analyse	4
2.1.1 Sélection des données d’exposition	4
2.1.2 Traitement des données d’exposition sur une période partielle.....	6
2.1.3 Traitement des données d’exposition présentées sous forme de paramètres de synthèse.....	6
2.1.4 Traitement des variables nominales.....	7
2.1.5 Analyse descriptive des déterminants de l’exposition	7
2.2 Modélisation statistique des niveaux d’exposition à la silice cristalline.....	8
2.2.1 Stratégie de modélisation.....	8
2.2.2 Sélection des variables incluses dans le processus de modélisation et création des ensembles de modèles plausibles	9
2.2.3 Estimation des niveaux d’exposition par titre d’emploi et par tâche.....	11
2.3 Modélisation statistique des niveaux d’exposition en poussières respirables	13
2.4 Analyse des teneurs en silice cristalline des échantillons de poussière respirable	13
3. RÉSULTATS.....	15
3.1 Données d’exposition retenues.....	15
3.2 Analyse descriptive des données d’exposition	16
3.3 Modélisation statistique des niveaux d’exposition à la silice cristalline et poussières respirables	23
3.3.1 Résultats globaux	23

3.3.2 Effets des déterminants de l’exposition	25
3.3.3 Prédications des niveaux d’exposition par titre d’emploi et par tâche	28
3.4 Analyse descriptive des pourcentages en silice cristalline.....	33
4. DISCUSSION	38
4.1 Données d’exposition retenues.....	38
4.2 Traitement des données d’exposition présentées sous forme de paramètres de synthèse	38
4.3 Modélisation statistique des niveaux d’exposition.....	39
4.3.1 Résultats globaux	39
4.3.2 Effets des déterminants de l’exposition	39
4.3.3 Prédications des niveaux d’exposition par titre d’emploi et par tâche	42
4.3.4 Comparaison entre les niveaux d’exposition en silice cristalline et en poussières respirables	43
4.4 Limites.....	45
4.4.1 Limites liées au manque de documentation des facteurs associés à l’exposition 45	
4.4.2 Limites liées à la représentativité et à la distribution des données d’exposition 45	
5. CONCLUSION	48
BIBLIOGRAPHIE.....	49
ANNEXES.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Variables incluses dans le processus de modélisation.....	10
Tableau 2 – Modifications aux scénarios de prédiction pour les variables de l’environnement et du secteur d’activité.....	12
Tableau 3 – Répartition des sources de données par type de document.....	16
Tableau 4 – Taille de l’échantillon, proportion de valeurs non-détectées et de valeurs simulées, période couverte, moyenne et écart-type géométriques totaux par analyse et par contaminant.....	17
Tableau 5 – Résultats descriptifs des données pour l’analyse selon le titre d’emploi.....	18
Tableau 6 – Résultats descriptifs des données pour l’analyse selon la tâche exécutée.....	20
Tableau 7 – Coefficients de détermination du modèle complet par analyse et contaminant.....	23
Tableau 8 – Cinq meilleurs modèles Tobit pour les quatre sous-banques.....	24
Tableau 9 – Effets estimés des déterminants de l’exposition (analyse par titre d’emploi).....	26
Tableau 10 – Effets estimés des déterminants de l’exposition (analyse par tâche spécifique).....	27
Tableau 11 – Prédications des niveaux d’exposition standardisés et fractions de dépassement par catégorie de titre d’emploi.....	29
Tableau 12 – Moyennes géométriques prédites et durées d’échantillonnage médianes par catégorie de tâches.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Processus de création des quatre sous-ensembles de la banque de données	4
Figure 2 – Nombre de lignes de données retenues selon le processus de restriction	15
Figure 3 – Moyennes géométriques prédites pour l’exposition à la silice cristalline respirable par catégorie de titre d’emploi (avec intervalles de confiance à 95 %)	29
Figure 4 – Moyennes géométriques prédites pour l’exposition à la silice cristalline respirable par catégorie de tâche (avec intervalles de confiance à 95 %)	30
Figure 5 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de titre d’emploi.....	34
Figure 6 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de tâche.....	35
Figure 7 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie d’outil	36
Figure 8 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de matériau ..	37
Figure 9 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de moyen de maîtrise à la source	37

ACRONYMES ET SIGLES

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AIHA	American Industrial Hygiene Association
BDEP	Banque de données d'exposition professionnelle
BTP	Bâtiment et travaux publics
CMP	Concentration moyenne pondérée
CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail
ÉDALI	Exploration des données d'analyse des laboratoires de l'IRSST
ETG	Écart-type géométrique
ETR	Écart-type relatif
IMIS	Integrated Management Information System
InVS	Institut de veille sanitaire
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LD	Limite de détection
Max	Valeur la plus élevée
MG	Moyenne géométrique
Min	Valeur la plus faible
ND	Non-déecté
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
RSST	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SS	Statistiques sommaires
TLV	Threshold Limit Value
VEMP	Valeur d'exposition moyenne pondérée
VLE	Valeur limite d'exposition

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Les problèmes de santé respiratoire découlant d’une exposition prolongée à la poussière minérale, en particulier chez les mineurs, sont connus depuis l’Antiquité. En plus d’augmenter le risque de cancer du poumon [1,2], l’inhalation de poussières de silice respirables peut causer une fibrose pulmonaire: la silicose. Celle-ci est l’une des plus anciennes maladies professionnelles reconnues. Le développement d’outils mécanisés pour le travail de la pierre au XX^e siècle a transformé cette maladie en un problème de santé au travail à grande échelle [3]. La problématique de l’exposition professionnelle à la silice a été à l’origine de la création des premières lois en santé au travail, et a entraîné le développement de moyens de prévention tels que l’utilisation de procédés humides et de ventilation en vue de réduire à la source l’émission de poussières [4-6]. Les nombreux efforts déployés depuis un siècle afin de prévenir cette maladie ont donc permis une amélioration appréciable des conditions de travail dans les industries les plus affectées, en particulier dans les mines et les carrières. Par ailleurs, des études récentes ont permis d’associer l’exposition à la silice à des effets sur la santé autres que ceux affectant le système respiratoire, soit des maladies rénales et des maladies auto-immunes, dont la polyarthrite rhumatoïde, le lupus érythémateux disséminé et la sclérodermie [7].

L’exposition à la silice cristalline reste malgré tout un problème d’actualité. En particulier, des niveaux d’exposition élevés ont été relevés par plusieurs études récentes dans le secteur de la construction [8-11], dans lequel œuvrent près des deux tiers des travailleurs potentiellement exposés à la silice au Québec [12]. L’industrie de la construction arrive au premier rang en ce qui a trait aux décès par silicose aux États-Unis entre 1990 et 1999 [13], et chez les travailleurs de moins de 45 ans entre 1968 et 2004 [14]. Au Québec, on dénombre 19 décès indemnisés liés à l’exposition à la silice dans le secteur du Bâtiment et Travaux Publics (BTP) entre 1995 et 2009 [15]. Entre 40 et 98 cas de silicose ont été déclarés annuellement entre 2006 et 2010¹ à l’échelle de la province, tous secteurs confondus [17].

Le secteur de la construction pose plusieurs défis méthodologiques pour l’analyse du risque associé à l’exposition à la silice. Ainsi, de nombreuses tâches sont susceptibles d’exposer les travailleurs à la silice cristalline puisque celle-ci est une des principales composantes de plusieurs matériaux de construction comme le béton, le ciment, le mortier et l’asphalte [18-20]. De plus, les conditions de travail sont très variables. Par exemple, l’exposition à la silice chez un manœuvre journalier peut varier d’une journée à l’autre, passant de nulle à élevée en fonction des tâches exécutées et du lieu de travail. La nature temporaire des chantiers de construction et la mobilité de la main-d’œuvre compliquent encore l’estimation de l’exposition et l’évaluation des risques à la santé. Depuis 2008, la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) applique une politique « tolérance zéro » pour l’exposition à la silice cristalline dans le secteur de la construction; engagement d’ailleurs reconduit pour l’année 2012 [21]. Le Plan d’action construction est lui-même présent dans le Plan stratégique 2010-2014 de la CSST [22].

¹ Le nombre de cas déclarés peut inclure des nouveaux cas et d’anciens cas nouvellement déclarés puisque la silicose fait partie des maladies à déclaration obligatoire depuis 2003 [16].

1.2 Banque de données québécoise d'exposition professionnelle à la silice dans le secteur du BTP (projet IRSST 0099-7530)

Les conditions d'exposition à la silice cristalline dans le secteur de la construction au Québec sont largement méconnues. Un rapport de la Direction de la santé publique de Montréal de 2007 a montré des niveaux fréquemment supérieurs aux recommandations à partir de 120 évaluations individuelles [10]. Les auteurs soulignaient les défis représentés par la variabilité importante des conditions de travail et la rareté des données dans ce secteur d'activité économique. D'après l'outil ÉDALI² récemment construit par Lavoué et coll. [23], une moyenne de seulement 10 mesures de silice respirable par an ont été prises par les équipes du réseau public québécois depuis 1985, dans le domaine de la construction. Dans le but d'améliorer les connaissances sur les conditions de travail pouvant exposer les travailleurs de la construction à la silice, et pour répondre à une demande initiale de la CSST, une équipe conjointe de l'Université de Montréal et de l'IRSST a monté une banque de données d'exposition professionnelle (BDEP) à ce contaminant à partir de la littérature. Ce premier projet a été financé par l'IRSST et a fait l'objet d'un rapport publié en 2011 par cet organisme [24]. La banque de données³ contient plus de 10 000 mesures d'exposition couvrant une période de 35 ans (1974-2009) et provenant de périodiques scientifiques, de banques de données externes et de rapports d'organismes de recherche. En plus de la littérature scientifique publique, les chercheurs ont eu accès à des ensembles de données inédits obtenus auprès de chercheurs associés au comité construction de l'ACGIH aux États-Unis, et de l'Institut national de veille sanitaire (InVS) en France. Chaque mesure a été associée à des éléments d'information permettant leur interprétation, dont les tâches exécutées, le type de matériau, les outils utilisés, et les moyens de prévention auxquels on a recourus.

Le projet IRSST 0099-7530 a permis de créer une ressource unique en son genre sur le plan international pour la connaissance de l'exposition à la silice dans le secteur de la construction. La revue de littérature classique effectuée sur les méthodes de prévention a permis de dégager plusieurs voies de recommandations et les analyses univariées (considérant l'effet de chaque variable indépendamment des autres), réalisées à partir des mesures quantitatives de la banque, ont permis d'identifier les métiers et tâches associées aux plus fortes expositions. Les chercheurs ont néanmoins souligné le potentiel important d'information additionnelle associé à l'emploi de techniques d'analyses multivariées, qui permettent de mesurer l'effet simultané de plusieurs facteurs sur les niveaux d'exposition. Un autre axe de développement mentionné par les auteurs a été le traitement des données présentées sous forme synthétique, par exemple une moyenne de 10 valeurs. Le raffinement au moyen d'outils d'analyse avancée du portrait d'exposition dressé lors de l'analyse descriptive de la banque de données silice constituait une recommandation des chercheurs à l'origine de sa création.

² Exploration des Données d'Analyse des Laboratoires de l'IRSST : <http://www.irsst.qc.ca/-outil-edali.html>

³ <http://www.irsst.qc.ca/-outil-bd-exposition-silice.html>

1.3 Objectifs

L’objectif principal de cette activité de recherche consistait à raffiner le portrait des expositions à la silice cristalline et à estimer la contribution des différents déterminants de l’exposition dans le secteur de la construction, à partir des mesures contenues dans la banque de données récemment créée, dans une optique de prévention des maladies professionnelles. Les objectifs spécifiques étaient:

- Estimer les concentrations en silice cristalline en fonction du titre d’emploi pour les données permettant une comparaison à une valeur limite d’exposition;
- Évaluer les concentrations en silice cristalline respirable en fonction de la nature de la tâche exécutée, afin d’estimer leurs contributions au profil d’exposition sur le quart de travail;
- Quantifier l’effet des déterminants de l’exposition tels que l’environnement et les caractéristiques des chantiers, ainsi que la réduction des concentrations apportée par les moyens de maîtrise à la source des poussières.

Bien que l’intérêt principal du projet soit axé sur l’exposition à la silice cristalline respirable, la banque de données contient également des résultats en poussières respirables dont une proportion importante est associée à la mesure de silice effectuée sur le même échantillon prélevé. Les données de la littérature indiquent que la teneur en silice cristalline des poussières respirables générées par les activités de construction peut être extrêmement variable [11, 25]; l’estimation des concentrations en silice cristalline à partir des poussières respirables n’est donc pas réellement envisageable. L’information sur les déterminants associée aux mesures de poussières peut toutefois permettre de raffiner les conclusions quant aux différents facteurs contribuant à l’exposition à la silice sur les chantiers. À cette fin, ce projet a également inclus les deux objectifs spécifiques suivants :

- Quantifier l’effet des déterminants de l’exposition sur les concentrations en poussières respirables afin de les comparer aux résultats en silice cristalline respirable;
- Explorer les variations des pourcentages en silice cristalline respirable selon des déterminants-clés de l’exposition, en particulier les titres d’emploi, les tâches, les outils et les matériaux.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Préparation de la banque de données d'analyse

2.1.1 Sélection des données d'exposition

Bien que la banque de données existante contienne plus de 6000 lignes d'informations correspondant à 11 845 mesures individuelles, il a été nécessaire de la restreindre aux données les plus pertinentes aux objectifs du travail. Pour ce faire, les données ont été divisées en deux sous-banques sur la base de la stratégie d'échantillonnage (figure 1). Afin d'évaluer l'exposition par titre d'emploi pour un quart de travail, une première sous-banque a été créée à partir des échantillons prélevés à des fins de comparaison des niveaux d'exposition à une valeur limite ou norme réglementaire. La seconde sous-banque a été développée en sélectionnant les mesures dont le prélèvement avait pour but d'évaluer l'exposition lors de la réalisation de tâches spécifiques. Les deux sous-banques ainsi créées ont ensuite été redivisées en deux selon la nature du contaminant échantillonné; l'une contenant des mesures de silice cristalline respirable (excluant la cristobalite) et l'autre des mesures de poussières respirables. Les résultats en cristobalite respirable n'ont pas été retenus dans nos analyses en raison d'un faible nombre de mesures et de la VLE différente en vertu du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST), soit $0,05 \text{ mg/m}^3$, comparativement à $0,1 \text{ mg/m}^3$ pour le quartz respirable [26].

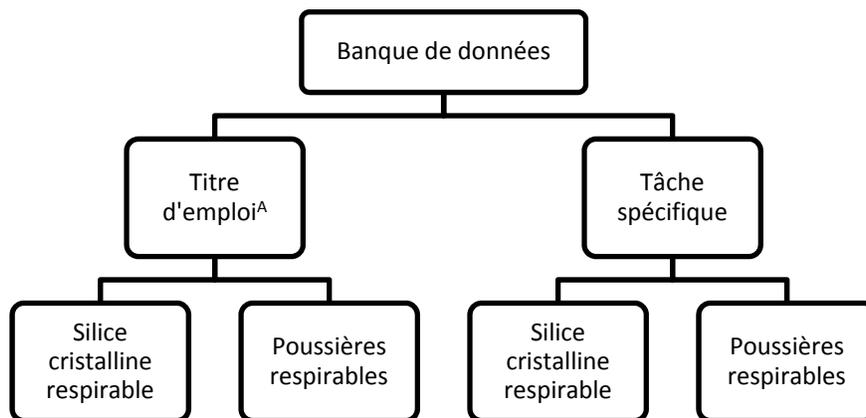


Figure 1 – Processus de création des quatre sous-ensembles de la banque de données

^A Regroupe les catégories « Moyenne 8 h » et « Conformité réglementaire » du paramètre « Objectif de la mesure » de la banque de données

Chacune des quatre sous-banques a ensuite été restreinte aux lignes de données rencontrant les critères suivants :

- La cote de qualité de l’information fournie sur les déterminants et la métrologie devait être acceptable ou excellente⁴.
- Le prélèvement devait avoir été effectué en zone respiratoire.
- La durée du prélèvement devait être disponible.
- Pour les mesures de silice cristalline, la métrologie devait avoir été effectuée en suivant une méthode référencée (p. ex. méthode IRSST 206-2⁵) ou dérivée d’une méthode référencée. Dans le cas des poussières respirables, les données ont été restreintes aux échantillons analysés par gravimétrie.
- Les conditions de travail évaluées devaient être représentatives des conditions réelles du milieu de la construction. Les études impliquant un devis expérimental et le contrôle des sources de variabilité environnementale ont donc été exclues.
- La moyenne et l’écart-type géométriques, ou des paramètres statistiques permettant de calculer une moyenne et un écart-type géométriques, devaient être disponibles pour les lignes de données présentant un résultat résumant un nombre de mesures d’exposition égal ou supérieur à deux.
- La description du titre d’emploi (pour l’analyse par titre d’emploi) ou de la tâche (pour l’analyse par tâche) devait être disponible. Pour les tâches, les données d’exposition associées à plus d’une tâche durant la période d’échantillonnage ont été exclues.

Pour l’analyse des niveaux d’exposition par titre d’emploi, les données correspondant à deux catégories du paramètre « Objectif de la mesure » dans la banque de données, soit « Conformité réglementaire » et « Moyenne 8 h », ont été sélectionnées. Les mesures associées à l’objectif de vérification de la conformité réglementaire de l’entreprise dans la banque sont majoritairement des résultats recueillis lors d’inspections réalisées par l’Occupational Safety and Health Administration (OSHA) américain. Les autres mesures dont l’objectif visait à documenter les niveaux d’exposition pour les comparer à une VLE sur huit heures ont été attribuées par défaut à la catégorie « Moyenne 8 h » lors du processus de compilation de la banque. À des fins de clarté, le terme « Moyenne 8 h » a été remplacé par « Surveillance » dans nos analyses.

⁴ Les cotes de qualité des paramètres descriptifs sur les déterminants et la métrologie pour chaque résultat de la banque de données ont été attribuées par les auteurs de celle-ci lors de l’étape de saisie des informations et sont présentées à l’annexe 3 du rapport R-692 de l’IRSST [24].

⁵ <http://www.irsst.qc.ca/-RSST14808-60-7.html>

2.1.2 Traitement des données d'exposition sur une période partielle

Dans le cas des mesures visant à comparer les niveaux d'exposition à une VLE, certaines données de la banque étaient identifiées en tant que deux ou plusieurs périodes consécutives échantillonnées lors d'un même quart de travail et sur un même travailleur. Les résultats pour ces lignes de données ont été agglomérés en calculant une concentration moyenne pondérée sur la période d'échantillonnage totale (équation 1).

$$CMP = \frac{C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots + C_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (1)$$

Où CMP : concentration moyenne pondérée; C_n : concentration à la période partielle n ; t_n : durée d'échantillonnage de la période partielle n .

Pour chaque résultat calculé en moyenne pondérée à partir des périodes partielles, une seule ligne de données a été conservée dans la sous-banque et elle représentait la période totale de l'évaluation. Par exemple, si trois lignes de données étaient identifiées comme étant des périodes partielles échantillonnées durant un même quart de travail sur un travailleur, une seule ligne était conservée pour l'analyse; la concentration et la durée associée à la période partielle étaient ensuite remplacées par la concentration moyenne pondérée et la durée d'échantillonnage totale des trois prélèvements.

2.1.3 Traitement des données d'exposition présentées sous forme de paramètres de synthèse

La banque de données recense à la fois des valeurs d'exposition associées à un seul échantillon (« mesures uniques ») et des valeurs résumant deux expositions et plus sous forme de paramètres de synthèse tels la moyenne et l'écart-type géométriques (MG et ETG). Une méthode originale, développée par Lavoué et coll. [27], permet de contourner les difficultés associées à l'analyse des données hétérogènes en recréant l'échantillon d'origine des résultats présentés sous forme de paramètres de synthèse par simulation Monte Carlo. Une fois la simulation réalisée, les données peuvent être analysées en utilisant les méthodes standards d'analyse de déterminants de l'exposition, principalement les modèles linéaires et leurs dérivés [28]. L'approche de Lavoué et coll. a récemment été mentionnée comme étant une alternative possible aux analyses traditionnelles de synthèse de la littérature combinant mesures individuelles et paramètres de synthèses [29].

La première étape de cette méthode consiste à uniformiser les paramètres de synthèse en estimant la MG et l'ETG correspondants. Pour les lignes de données dont les résultats étaient présentés sous une autre forme, la MG et l'ETG ont été estimés à partir des autres paramètres statistiques rapportés, soit la moyenne et l'écart-type arithmétiques, la médiane et/ou la fourchette. 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 [30], et sont présentées dans Lavoué et coll. [27]. La connaissance de la distribution log-normale correspondant aux paramètres de synthèse rapportés permet de générer par

simulation un nombre de mesures égal à la taille de l’échantillon original et conforme à la distribution d’où il provenait (équation 2).

$$x = \exp[\ln(MG) + z \times \ln(ETG)] \quad (2)$$

Où x : valeur d’exposition individuelle; z : valeur aléatoire tirée d’une distribution normale standard $N(0,1)$ ⁶.

Les valeurs d’exposition individuelles ainsi créées peuvent alors être ajoutées aux mesures uniques et analysées conjointement à l’aide de méthodes adaptées aux ensembles de données constituées de mesures d’exposition uniques.

2.1.4 Traitement des variables nominales

Pour certaines variables présentées au tableau 1, les catégories comportant un faible nombre de mesures ont fait l’objet d’agrégation. Le traitement a été réalisé en agglomérant les catégories jugées a priori similaires (jugements portés par les auteurs JFS et CB) ou en les regroupant au sein d’une catégorie « Autre ». Par exemple, la catégorie d’environnement « intérieur » regroupe les catégories d’espace clos, restreint (p. ex. cage d’escalier, tunnel) et fermé, alors que les mesures provenant des secteurs industriel, institutionnel et commercial ont été combinées dans la catégorie « Industriel/Institutionnel et commercial ». Les catégories de moyens de maîtrise à la source « Ventilation par aspiration à proximité de l’outil » et « Ventilation par aspiration sur l’outil » ont également été regroupées pour créer la catégorie « Ventilation locale » pour l’analyse des niveaux d’exposition associés aux tâches.

Les catégories de titre d’emploi et de tâches associées à moins de 10 mesures ont été respectivement regroupées dans la catégorie « Autre » et « Autres tâches ». Pour cette dernière, de nouvelles catégories ont ensuite été créées à partir de la description de la tâche dans la source documentaire, soit « Travaux de fondation », « Travaux d’excavation », « Autres travaux routiers » et « Autres tâches reliées à la maçonnerie ». De plus, la distinction entre les cinq sous-catégories pour l’occupation de travailleur souterrain dans la banque de données (arpenteur, foreur, manœuvre pipeline et manœuvre spécialisé, autres) a été éliminée en raison d’un nombre insuffisant de mesures.

Le processus de sélection des données présenté à la section 2.1.1 indique l’exclusion des lignes de données où la description du titre d’emploi et/ou de la tâche était manquante. Pour les autres variables nominales, les lignes de données dont un ou plusieurs de ces paramètres n’étaient pas documentés ont été conservées dans les analyses et identifiées par la catégorie « Non précisé ».

2.1.5 Analyse descriptive des déterminants de l’exposition

Chacune des quatre sous-banques a fait l’objet d’une analyse descriptive afin d’orienter la stratégie de modélisation et la sélection des variables incluses dans le processus. Des moyennes et écarts-types géométriques ont été calculés à la fois sur l’ensemble des mesures et pour chaque catégorie des variables nominales. De plus, les analyses préliminaires ont permis d’identifier la

⁶ Par exemple, à l’aide de la fonction `LOI.NORMALE.INVERSE(ALEA();0;1)` du chiffrier Excel

présence de résultats dont la concentration rapportée était plus petite que la limite de détection de la méthode d'analyse dans les quatre sous-banques, en particulier pour les échantillons de silice cristalline respirable. Afin de tenir compte des valeurs non détectées dans le calcul des MG et ETG, nous avons utilisé la méthode de régression robuste sur les statistiques d'ordre, « Robust regression on order statistics (Robust ROS) » [31], reconnue supérieure à la méthode de substitution simple utilisée traditionnellement en hygiène du travail [32], et appliquée récemment pour l'analyse de données d'exposition professionnelle [23,33].

Compte tenu du caractère probabiliste de la simulation, le calcul des MG et ETG, sur l'ensemble des mesures et pour chaque strate des différentes variables analysées, a été effectué en répétant la procédure de simulation 100 fois. Pour chaque itération, des valeurs d'exposition individuelles ont été simulées pour les concentrations rapportées sous forme de paramètres de synthèse puis combinées aux mesures uniques. Les MG et ETG globaux et pour chaque strate des déterminants ont ensuite été calculés. Les valeurs médianes des MG et ETG à travers les 100 répétitions ont été utilisées comme estimation finale. Nous avons également estimé la variabilité causée par la simulation en calculant des écarts-types relatifs (ETR)⁷.

2.2 Modélisation statistique des niveaux d'exposition à la silice cristalline

2.2.1 Stratégie de modélisation

L'influence simultanée des différents déterminants sur les niveaux d'exposition a été estimée en effectuant des analyses de modélisation statistique multivariées pour chaque sous-banque. La modélisation statistique consiste à expliquer la relation entre une variable de réponse – dans notre cas les concentrations en silice cristalline respirable – et une ou plusieurs variables prédictives (p. ex. poste de travail, tâche exécutée, environnement de travail, etc.). La présence d'une variable dans le modèle suppose qu'elle a une influence sur la réponse. À l'opposé, l'absence d'une variable dans le modèle final implique qu'elle n'est pas associée à la réponse, ou encore que la valeur des coefficients associés à cette variable est de zéro.

La procédure de modélisation statistique employée dans cette étude est basée sur une technique provenant du domaine de l'écologie [34,35] et récemment utilisée pour analyser les données d'exposition professionnelle [36,37]. Elle repose sur la définition *a priori* d'un groupe de modèles plausibles, construits à partir de combinaisons uniques des variables à l'étude. Ainsi, contrairement aux approches traditionnelles, l'inférence est effectuée à partir de tous les modèles. Les résultats finaux sont obtenus en agglomérant les résultats de tous les modèles en utilisant une pondération en fonction de la qualité de l'ajustement de chaque modèle aux données. Dans le cadre de nos analyses, la qualité de l'ajustement de chaque modèle a été établie à partir du critère d'information corrigé de Akaike (AICc) [38]. Le facteur de pondération de chaque modèle est une valeur variant entre 0 (« mauvais modèle ») et 100 % (« bon » modèle), et la somme des facteurs de pondération à travers tous les modèles est égale à 100 %. Ainsi, contrairement à des approches plus traditionnelles comme la procédure de régression par degrés qui aboutissent à la sélection d'un seul modèle final, celle-ci permet d'intégrer les informations

⁷ Rapport entre l'écart-type et la moyenne arithmétique ou la médiane des estimations sur l'ensemble des répétitions, exprimé en pourcentage.

provenant de plusieurs modèles plausibles et de tenir compte de l’incertitude associée au choix d’un seul modèle [39,40].

Les coefficients de régression « multimodèle » sont obtenus en calculant une moyenne des coefficients de chacun des modèles, chaque valeur individuelle étant ajustée par le facteur de pondération du modèle correspondant. Pour une variable absente d’un modèle, les coefficients prennent la valeur de 0; une variable présente seulement dans des modèles avec un facteur de pondération faible verra ainsi son effet atténué, un phénomène appelé « rétrécissement » (*shrinkage* en anglais).

Des modèles de régression Tobit [41,42] ont été utilisés afin de prendre en compte la présence des valeurs non détectées dans l’analyse des quatre sous-banques. Puisque la simulation de valeurs d’exposition individuelles dérivées des résultats rapportés sous forme de paramètres de synthèse implique une composante aléatoire, elle doit être répétée plusieurs fois. Ainsi, la modélisation statistique des niveaux d’exposition pour chaque sous-banque a été appliquée à chacune des 20 itérations de la procédure de simulation détaillée à la section 2.1.3. Pour chaque itération, la procédure multimodèle a été appliquée aux mesures uniques et simulées mises en commun pour calculer les coefficients multimodèles. La valeur finale de chaque coefficient multimodèle a été obtenue en prenant la moyenne arithmétique de leurs valeurs à travers les 20 répétitions de la procédure de simulation. La variabilité dans les valeurs des coefficients causée par la simulation a été estimée par le calcul de leurs écarts-types relatifs à travers les 20 simulations.

2.2.2 Sélection des variables incluses dans le processus de modélisation et création des ensembles de modèles plausibles

2.2.2.1 Sélection des variables incluses dans le processus de modélisation

La grille de saisie de la banque de données comprend 77 champs par ligne contenant les informations de nature contextuelle et métrologique, ainsi que des valeurs numériques de l’exposition rapportées dans les différentes publications. Les variables potentielles ont d’abord été restreintes aux paramètres codifiés, éliminant par exemple les champs contenant des informations non standardisées tels les commentaires généraux et les précisions sur la méthode d’analyse et/ou du moyen de maîtrise. Ensuite, seules les variables dont la description était disponible pour une proportion suffisante de mesures ont été retenues. Lors de cette étape, les paramètres reliés à la protection respiratoire, à la présence de source d’exposition secondaire et à la teneur en silice du matériau en vrac ont été exclus.

Les paramètres reliés aux méthodes de prélèvement et d’analyse des échantillons n’ont pas été inclus dans le processus de modélisation. Pour les échantillons en silice cristalline respirable, les méthodes d’analyses répertoriées étaient basées sur la diffractométrie des rayons X ou la spectrophotométrie infrarouge, qui donnent des résultats similaires [43,44], bien que cette dernière ait une spécificité légèrement plus faible [45]. Quant à l’instrument d’échantillonnage, plusieurs modèles de cyclones (p. ex. Dorr-Oliver, Higgins-Dewell) et d’impacteurs en cascade étaient représentés dans les différentes sous-banques. L’influence potentielle de l’instrument utilisé sur les concentrations mesurées n’a toutefois pu être évaluée, car certains déterminants n’étaient associés qu’à un seul type de cyclone. De plus, bien que la conception et le débit

recommandé puissent varier selon le type d'appareil, les écarts entre les fractions échantillonnées par les instruments présents dans les quatre sous-banques et les poussières respirables telles que définies par l'ACGIH et les organismes internationaux de normalisation sont relativement mineurs [46-48]. Les données ayant été restreintes aux échantillons dont l'analyse et le prélèvement ont été réalisés selon des méthodes référencées (ou apparentées à ces méthodes), les différences potentiellement dues à ces paramètres sur les concentrations mesurées ont été jugées négligeables dans le cadre de nos analyses. Les variables retenues dans le processus de modélisation pour chaque analyse sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 – Variables incluses dans le processus de modélisation

Variable	Type	Analyse	
		Titre d'emploi	Tâche
Durée (ln(min)) ^A	C ^B	X	X
Année d'échantillonnage	C ^B	X	X
Titre d'emploi	N ^C	X ^D	
Tâche exécutée	N		X ^D
Secteur d'activité	N	X	X
Type de projet	N	X	X
Stratégie d'échantillonnage	N	X	
Environnement	N	X	X
Maîtrise (utilisation) ^E	N	X	
Maîtrise à la source (type)	N		X ^D
Ventilation (dilution)	N		X

^A Durée de prélèvement à la suite de la transformation logarithmique

^B Variable numérique continue

^C Variable nominale

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

^E Utilisation ou non d'un moyen de maîtrise, sans égard au type spécifique

2.2.2.2 Création des ensembles de modèles plausibles

L'approche multimodèle implique la définition d'un ensemble ou liste de modèles plausibles contenant des combinaisons uniques des variables explicatives. Par exemple, si l'on a trois variables d'intérêt (A, B, C), on peut définir une liste de huit modèles possibles : le premier vide (correspondant à l'absence de toute influence des trois variables), trois modèles avec une seule variable (A, B, ou C), trois modèles avec deux variables (AB, AC, BC), et un modèle contenant toutes les variables (ABC). Des connaissances préalables peuvent servir d'avance à exclure ou inclure dans la liste un certain nombre de modèles.

L'élaboration des ensembles de modèles de l'analyse de l'exposition selon le titre d'emploi a été amorcée par la décision d'inclure la variable du titre d'emploi standardisé dans tous les modèles testés. L'ensemble de modèles a ensuite été construit en utilisant toutes les combinaisons

possibles (présence/absence des sept autres variables présentées dans le tableau 1). Cette approche a donné une liste préliminaire de 128 modèles. Trois termes d’interaction ont ensuite été ajoutés dans le processus de modélisation. Les interactions permettent de tenir compte de la modification possible de la relation entre la réponse et une variable par les différents niveaux d’une autre variable. Par exemple, les mesures dans cette sous-banque étaient associées à deux catégories de stratégie d’échantillonnage, soit l’évaluation de la conformité réglementaire de l’entreprise, et la surveillance de l’exposition. Afin d’évaluer si les tendances temporelles de l’exposition étaient différentes entre les deux catégories de stratégies, une interaction entre les variables de l’année du prélèvement et la stratégie d’échantillonnage a été intégrée dans le processus de modélisation. En l’absence de cette interaction, la tendance temporelle pourrait être interprétée comme étant identique pour les deux stratégies. Une interaction entre la variable de stratégie et la durée d’échantillonnage a également été intégrée au processus de modélisation, puisque nous avons observé des durées d’échantillonnage généralement plus courtes pour les données recueillies lors d’inspections. Finalement, une interaction entre l’environnement et l’utilisation d’un moyen de maîtrise a été testée afin d’évaluer l’influence de l’utilisation ou non d’un moyen de maîtrise lors de travaux effectués soit à l’extérieur ou à l’intérieur. Il est à noter que, pour qu’on puisse ajouter un terme d’interaction entre deux variables dans un modèle, celles-ci doivent nécessairement être présentes dans le modèle. À titre d’exemple, l’ajout d’une interaction entre les variables A et B dans une procédure multimodèle est effectuée comme suit : si la liste contient 100 modèles, dont 25 contiennent les deux variables A et B, on rajoute à la liste 25 modèles identiques auxquels on a greffé le terme d’interaction. À la suite de l’ajout des trois termes d’interaction énumérés ci-dessus dans le processus de modélisation, l’ensemble de modèles plausibles pour cette analyse contenait 260 modèles.

Pour l’analyse des niveaux d’exposition en fonction des tâches, la liste de modèles a été amorcée par la décision d’inclure les variables de tâche exécutée et du type de moyen de maîtrise dans tous les modèles. Au même titre que l’analyse de l’exposition selon le titre d’emploi, l’ensemble de modèles a été construit à partir de toutes les combinaisons présence/absence des six autres variables énumérées au tableau 1, pour une liste initiale de 64 modèles. De plus, l’information sur la ventilation générale associée aux mesures dans les sources de données a été saisie dans la banque sous forme de présence/absence; la présence pouvant être à la fois de la ventilation mécanique à l’intérieur et du vent fort à l’extérieur. Afin de tenir compte d’effets potentiellement différents entre la présence de courants d’air à l’extérieur et la ventilation mécanique à l’intérieur, une interaction entre les variables de ventilation et d’environnement a été intégrée au processus de modélisation pour un ensemble final comprenant 80 modèles.

Les concentrations en silice cristalline ainsi que la durée d’échantillonnage ont fait l’objet d’une transformation logarithmique, alors que l’année de l’évaluation a été normalisée en soustrayant la valeur minimale de l’année dans chaque sous-banque. Pour les variables nominales, la catégorie comportant le plus grand nombre de mesures (excluant la catégorie « non précisé », si elle était présente) a été sélectionnée en tant que niveau de référence.

2.2.3 Estimation des niveaux d’exposition par titre d’emploi et par tâche

L’estimation des niveaux d’exposition par titre d’emploi et par tâche a été effectuée à partir de scénarios de prédiction prédéfinis. Pour chaque variable nominale autre que le titre d’emploi ou

la tâche, les prédictions ont été établies en donnant une part égale à toutes les catégories à l'exception de celle « non précisée» (si elle était présente). Cette approche visait à standardiser les niveaux prédits en les basant sur une distribution équilibrée des diverses circonstances associées à l'exposition à la silice cristalline. Quelques modifications ont toutefois dû être apportées pour certains titres d'emploi et pour certaines tâches associées à un nombre limité de conditions de travail dans leurs sous-banques respectives (Tableau 2). Par exemple, seul l'effet de l'environnement extérieur a été utilisé pour les prédictions des niveaux d'exposition de la tâche « Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte », puisque toutes les mesures ont été prises dans ces conditions. Par ailleurs, puisque certaines tâches, par exemple celles de nature manuelle, n'étaient pas compatibles avec tous les moyens de maîtrise évalués, les prédictions pour cette analyse ont été réalisées en supposant une absence de moyen de maîtrise.

Tableau 2 – Modifications aux scénarios de prédiction pour les variables de l'environnement et du secteur d'activité.

Exposition selon le titre d'emploi	Modifications au scénario de prédiction
Couvreur	Environnement = Extérieur Secteur = Résidentiel
Foreur	Environnement = Extérieur
Travailleur souterrain	Environnement = Intérieur Secteur résidentiel exclu
Exposition selon la tâche exécutée	Modifications au scénario de prédiction
Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte	Environnement = Extérieur Secteur = Génie civil et voirie
Travaux de fondations	Environnement = Extérieur Secteur = Génie civil et voirie
Travaux d'excavation	Environnement = Extérieur Secteur = Génie civil et voirie
Forage de tunnels	Environnement = Intérieur Secteur = Génie civil et voirie

Pour les variables continues, la valeur médiane de l'année de l'évaluation sur l'ensemble des données, par sous-banque, a été intégrée au scénario de prédiction de chaque analyse. Les niveaux d'exposition par titre d'emploi ont été prédits pour une durée d'échantillonnage de huit heures afin de comparer les résultats aux valeurs limites en vigueur. Pour l'exposition en fonction de la nature de la tâche, nous avons utilisé la durée d'échantillonnage médiane par catégorie pour tenir compte de la durée d'exécution des différentes opérations.

Les scénarios décrits précédemment visaient à estimer les niveaux d'exposition globalement en considérant une distribution équilibrée des circonstances représentées dans les sous-banques. Il est toutefois possible d'obtenir des prédictions plus spécifiques à partir des caractéristiques d'un milieu de travail donné pour les tâches ou les postes de travail. À cet effet, un exemple de calcul de prédiction de moyenne géométrique à partir des coefficients multimodèles est présenté à l'annexe 6.

La prédiction des niveaux d'exposition a été appliquée en utilisant 20 répétitions de la procédure de simulation Monte-Carlo. Pour chaque répétition, les niveaux d'exposition par titre d'emploi ou par tâche ont été estimés pour chacun des modèles puis agrégés selon le facteur de pondération de chaque modèle. La valeur moyenne sur les 20 répétitions a été utilisée en tant qu'estimation finale, et la variabilité des prédictions à travers les 20 itérations a été évaluée par le calcul d'ETR.

2.3 Modélisation statistique des niveaux d'exposition en poussières respirables

La modélisation statistique des niveaux d'exposition en poussières respirables a été réalisée en suivant les mêmes procédures que pour la silice cristalline. Pour la modélisation de l'exposition par titre d'emploi, la variable du type de projet et l'interaction entre l'environnement et l'utilisation d'un moyen de maîtrise ont dû être exclues du groupe de modèles en raison de la distribution inégale des données entre les catégories, résultant en un groupe de 104 modèles. Pour l'analyse des données associées aux tâches, le groupe de modèles était identique à l'analyse correspondante des échantillons de silice cristalline (80 modèles). Afin de simplifier la comparaison aux résultats en silice cristalline respirable, les mêmes catégories de référence pour les variables nominales ont été utilisées pour les deux analyses.

Les niveaux d'exposition standardisés ont été prédits pour les poussières respirables en fonction du titre d'emploi et de la nature de la tâche exécutée en utilisant les mêmes scénarios que pour les analyses des données en silice cristalline. L'accord entre les MG prédites pour la silice cristalline respirable et les poussières respirables (pour les catégories présentes dans les deux analyses seulement) a été évalué en calculant le coefficient de corrélation de Spearman, une méthode non paramétrique. Une valeur de 1 signifie que l'ordre des MG prédites par catégorie pour la silice cristalline est exactement le même que pour les poussières respirables; à l'opposé, une valeur de -1 indique que l'ordre des MG prédites entre les deux contaminants est parfaitement inversé. Une valeur du coefficient de 0 indique une absence de relation entre les MG prédites en silice cristalline et celles en poussières respirables pour les titres d'emploi et/ou les tâches.

2.4 Analyse des teneurs en silice cristalline des échantillons de poussière respirable

L'analyse des pourcentages en silice cristalline respirable a nécessité trois étapes de sélection de données en plus des critères de restriction énumérés à la section 2.1.1 :

- Seules les lignes de données associées à des mesures uniques ont été retenues.
- Seuls les prélèvements associés à la fois à une valeur en poussière respirable et en silice cristalline respirable ont été retenus.
- Seules les lignes de données dont la concentration en silice cristalline respirable était supérieure à la limite de détection ont été retenues. Cette étape a également entraîné l'exclusion des lignes de données en poussières respirables apparentées.

À la suite de ces étapes de restriction, les données associées aux titres d'emploi et aux tâches ont été combinées. Le pourcentage en silice cristalline respirable a été calculé en divisant la concentration rapportée pour chaque résultat en silice cristalline par la concentration correspondante en poussière respirable.

Les 10^e, 25^e, 50^e, 75^e et 90^e centiles ont été utilisés pour représenter la distribution des pourcentages sur l'ensemble des données par catégorie : titre d'emploi, tâche, outil, matériau et moyen de maîtrise à la source. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel R [49]

3. RÉSULTATS

3.1 Données d’exposition retenues

Approximativement 87 % des données de la banque provenaient d’échantillons prélevés dans le but d’être comparés à une VLE ou durant l’exécution d’une tâche. Les 795 lignes de données exclues à la première étape de restriction étaient celles dont la stratégie d’échantillonnage était inconnue (N=763), et quelques lignes (N=32) pour lesquelles la stratégie était clairement identifiée comme appliquant le principe du pire scénario (*worst case scenario*). La restriction sur la base du contaminant échantillonné a éliminé 418 lignes de données supplémentaires. Le nombre de lignes de données retenues en fonction des critères de restriction est illustré à la figure 2.

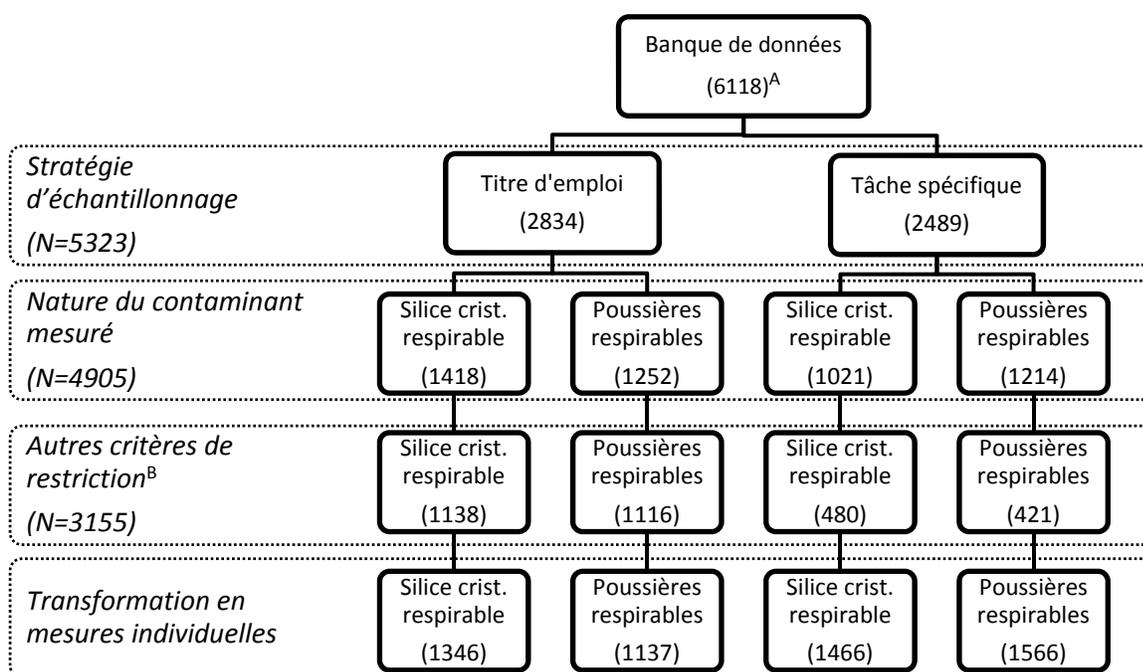


Figure 2 – Nombre de lignes de données retenues selon le processus de restriction

^A Nombre de lignes de données retenues dans la banque ou sous-banques après les étapes de restriction décrites à la section 2.1.1

^B Pour les analyses par titre d’emploi, cette étape comprend l’agglomération de lignes lors du calcul de valeurs moyennes pondérées, tel que décrit à la section 2.1.2

Pour la sous-banque contenant les mesures de silice cristalline prélevées à des fins de comparaison à une VLE, le nombre de lignes de données retenues s’élevait à 1138, comprenant 39 valeurs d’exposition moyennes pondérées calculées à partir de 85 lignes de données, et excluant 12 échantillons associés au titre d’emploi de chaudronnier dont toutes les concentrations étaient sous la limite de détection. Ces derniers ont été exclus de nos analyses puisqu’aucune méthode ne permet d’obtenir des statistiques descriptives valides avec un pourcentage de valeurs non détectées supérieur à 80 % [31,50,51]. Les 1138 lignes de données représentaient 1346

mesures individuelles. Pour les échantillons en poussières respirables, 1116 lignes de données ont été retenues, dont 941 étaient associées à un résultat en silice cristalline respirable.

Pour les données dont le prélèvement visait à documenter les niveaux durant une tâche, 421 lignes de poussières respirables et 480 lignes de silice cristalline respirable ont été retenues, dont 324 résultats associés aux deux contaminants. Comparativement aux deux autres sous-banques, la proportion de lignes d'information éliminées par le processus de restriction était beaucoup plus importante. Cette observation s'explique par une part plus élevée d'échantillons prélevés en ambiance ou à la source et/ou analysés à l'aide d'instruments à lecture directe. De nombreux résultats issus d'études expérimentales évaluant l'efficacité de moyens de maîtrise dans des conditions contrôlées ont aussi été éliminés. À la suite de la transformation des concentrations rapportées sous forme de paramètres de synthèse décrite à la section 2.1.3, le nombre total de valeurs individuelles s'élevait à 1466 pour la silice cristalline et à 1566 pour les poussières respirables.

Le nombre de sources de données et le pourcentage de valeurs individuelles par type de document pour chaque sous-banque sont présentés au tableau 3. La majorité des documents utilisés provenaient de rapports de recherche d'organismes publics, en particulier ceux du National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) américain. En termes de nombre de mesures toutefois, les sources principales étaient la banque de données de Flanagan et coll. [8] pour les analyses de l'exposition selon le titre d'emploi, et les articles de périodiques scientifiques pour l'analyse des niveaux associés aux tâches.

Tableau 3 – Répartition des sources de données par type de document

Type de document	Titre d'emploi		Tâche spécifique	
	Silice crist.	Poussières	Silice crist.	Poussières
Article de périodique	3 ^A (17%) ^B	1 (3%)	20 (77%)	15 (79%)
Rapport d'organisme public	28 (36%)	26 (33%)	25 (17%)	24 (14%)
Banque de données	1 (47%)	1 (64%)	1 (7%)	1 (7%)
Total	32	28	46	40

^A Nombre de sources de données

^B Pourcentage de valeurs d'exposition individuelles. Les pourcentages ayant été arrondis, le total peut ne pas être égal à 100 %.

3.2 Analyse descriptive des données d'exposition

Le tableau 4 présente le nombre de valeurs d'exposition individuelles, la proportion de valeurs non détectées et simulées, la période temporelle couverte et la MG et l'ETG globaux pour chaque sous-banque. Les MG et ETG rapportés dans le tableau 4 incluent la valeur minimale, médiane et maximale de ces estimations sur les 100 répétitions de la procédure de simulation. Les résultats descriptifs (p. ex. tailles d'échantillon, MG et ETG) par catégorie pour chaque variable nominale répertoriée au tableau 1 sont, quant à eux, présentés au tableau 5 pour les données associées à l'exposition selon le titre d'emploi, et au tableau 6 pour celles associées à la tâche.

Tableau 4 – Taille de l’échantillon, proportion de valeurs non détectées et de valeurs simulées, période couverte, moyenne et écart-type géométriques totaux par analyse et par contaminant.

Contaminant	Titre d’emploi		Tâche spécifique	
	Silice crist.	Poussières	Silice crist.	Poussières
N ^A	1346	1137	1466	1566
%ND ^B	24%	<1%	6%	<1%
%simulées ^C	17%	2%	71%	77%
Période couverte	1991-2006	1991-2006	1988-2007	1988-2005
MG (mg/m ³) ^D	0,08	1,1	0,05	0,80
(min-max)	(0,08-0,09)	(1,1-1,1)	(0,05-0,05)	(0,76-0,86)
ETG ^E	6,0	5,5	8,7	6,6
(min-max)	(6,0-6,1)	(5,5-5,5)	(8,3-9,2)	(6,2-7,0)

^A Total des valeurs d’exposition individuelles

^B Pourcentage des valeurs rapportées sous la limite de détection

^C Pourcentage de valeurs d’expositions individuelles simulées à partir des paramètres de synthèse

^D Moyenne géométrique calculée sur l’ensemble des valeurs individuelles (médiane et étendue sur 100 répétitions)

^E Écart-type géométrique calculé sur l’ensemble des valeurs individuelles (médiane et étendue sur 100 répétitions)

La période couverte par l’ensemble des données contenues dans les quatre sous-banques totalisait près de 20 ans. Le nombre d’échantillons dont la concentration en silice cristalline respirable était non détectée était de 318 (24 %) pour l’analyse des données selon le titre d’emploi et de 94 (6 %) pour celles associées aux tâches.

Pour l’analyse de l’exposition par titre d’emploi, une différence importante entre les deux catégories de stratégie d’échantillonnage (conformité réglementaire et surveillance) a été observée quant à la durée des prélèvements. Pour les données de conformité réglementaire, la médiane de 170 minutes pour les deux contaminants était moins de la moitié de la durée médiane de celles de surveillance avec 459 minutes (silice cristalline) et 410 minutes (poussières). Pour les tâches, la valeur médiane de la durée d’échantillonnage était de 334 minutes pour la silice cristalline, et 315 pour les poussières.

Tableau 5 – Résultats descriptifs des données pour l’analyse selon le titre d’emploi

	Silice cristalline							Poussières						
	n ^A	nE ^B	ND ^C (%)	SS ^D (%)	MG ^E (mg/m ³)	ETR ^F (%)	ETG ^G	n	nE	ND (%)	SS (%)	MG (mg/m ³)	ETR (%)	ETG
Total	1346	33	24	17	0,08	1	6,0	1137	28	<1	2	1,1	<1	5,5
Titre d'emploi														
Autre	57	4	60	0	0,05	0	4,3	89	6	0	0	0,89	0	5,1
Briqueteur-maçon	234	8	21	22	0,13	1	6,9	204	6	0	0	1,9	0	6,5
Chaudronnier								12	1	0	100	0,28	10	1,4
Cimentier-applicateur	146	9	16	24	0,15	5	7,0	114	7	1	0	2,8	0	5,6
Contremaître	13	4	8	62	0,04	6	1,9							
Couvreur	53	5	0	0	0,15	0	2,4	59	5	0	0	1,1	0	2,2
Foreur	12	4	8	0	0,21	0	3,4	10	3	0	0	1,5	0	7,7
Manœuvre (journalier)	226	9	28	21	0,06	1	6,9	190	7	0	0	0,90	0	5,5
Manœuvre pipeline	58	4	29	0	0,10	0	4,7	53	3	0	0	2,7	0	4,5
Manœuvre spécialisé	357	18	23	17	0,07	1	4,5	256	14	0	0	1,1	0	4,9
Opérateur d'équipement lourd	153	10	29	8	0,05	2	3,6	150	9	0	9	0,37	2	3,2
Travailleur souterrain	37	3	8	32	0,26	7	5,9							
Secteur d'activité														
Génie civil et voirie	368	12	23	11	0,05	1	4,5	278	10	0	5	0,47	1	4,6
Industriel, institutionnel et commercial	175	16	23	0	0,10	0	6,4	183	15	0	7	1,5	1	4,6
Résidentiel	82	9	0	4	0,13	1	2,7	66	7	0	0	1,2	0	2,4
Non précisé	721	5	27	25	0,10	1	6,5	610	4	0	0	1,5	0	5,9
Type de projet														
Construction nouvelle	105	14	27	3	0,06	1	6,2	74	11	0	0	0,69	0	6,0
Démolition	115	5	1	24	0,09	3	3,3	20	4	0	0	1,6	0	3,0
Rénovation	251	11	28	6	0,05	1	5,5	253	10	0	10	0,44	1	4,3
Non précisé	875	9	25	21	0,11	1	6,0	790	7	0	0	1,6	0	5,3

	Silice cristalline							Poussières						
	n ^A	nE ^B	ND ^C (%)	SS ^D (%)	MG ^E (mg/m ³)	ETR ^F (%)	ETG ^G	n	nE	ND (%)	SS (%)	MG (mg/m ³)	ETR (%)	ETG
Stratégie d'échantillonnage														
Conformité réglementaire	644	2	33	0	0,11	0	8,2	412	27	0	6	0,58	1	4,5
Surveillance	702	30	15	33	0,07	1	3,8	725	1	0	0	1,6	0	5,5
Environnement														
Extérieur	451	25	22	7	0,06	1	4,9	365	21	0	4	0,53	1	4,4
Intérieur	77	8	3	16	0,15	3	3,5	43	8	0	28	1,4	3	4,0
Non précisé	818	4	26	22	0,10	1	6,4	729	3	0	0	1,6	0	5,5
Maîtrise (utilisation)														
Non	267	20	16	12	0,08	1	4,5	205	16	1	3	0,67	1	4,3
Oui	242	18	22	5	0,06	1	4,4	182	17	0	4	0,72	1	4,7
Non précisé	837	5	27	22	0,10	1	6,8	750	4	0	2	1,4	0	5,7

^A Total des valeurs d'exposition individuelles

^B Nombre de sources dont sont tirées les valeurs d'exposition

^C Pourcentage de valeurs non détectées

^D Pourcentages de valeurs d'exposition individuelles simulées

^E Moyenne géométrique (médiane des 100 répétitions)

^F Écart-type relatif de la moyenne géométrique sur les 100 répétitions

^G Écart-type géométrique (médiane des 100 répétitions)

Tableau 6– Résultats descriptifs des données pour l’analyse selon la tâche exécutée

	Silice cristalline							Poussières						
	n ^A	nE ^B	ND ^C (%)	SS ^D (%)	MG ^E (mg/m ³)	ETR ^F (%)	ETG ^G	n	nE	ND (%)	SS (%)	MG (mg/m ³)	ETR (%)	ETG
Total	1466	46	6	71	0,05	3	8,7	1566	40	<1	77	0,80	2	6,6
Tâche														
Arrosage								13	1	0	100	0,04	31	3,1
Autres tâches reliées à la maçonnerie	14	3	0	50	0,03	12	4,4	16	3	0	44	0,96	14	2,6
Autres travaux routiers	47	4	6	51	0,02	9	3,8	34	3	0	71	0,18	13	3,7
Boucharder le béton	12	2	50	0	0,44	0	3,1	12	2	33	0	2,9	0	5,2
Cassage - Autres outils	21	4	10	0	0,13	0	7,4	17	2	0	0	1,6	0	5,9
Cassage - Marteau perforateur	56	2	7	0	0,46	0	2,7	63	2	0	0	3,5	0	2,7
Cassage - Outils multiples (incluant marteaux perforateurs/piqueurs)	88	3	6	93	0,94	13	4,7	83	2	0	99	11	13	3,5
Conduite d'équipement lourd								35	2	0	94	0,07	28	6,7
Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte	40	3	10	0	0,02	0	2,8	42	3	5	0	0,38	0	2,5
Décapage par projection d'abrasif	23	5	4	61	0,81	22	6,3	23	5	0	61	7,1	29	8,8
Démolition	32	2	0	97	0,03	36	6,1	32	2	0	97	0,24	30	4,7
Déplacement manuel de petites pierres, sol etc.	11	2	9	0	0,09	0	2,6							
Déplacement mécanique de pierre, sol etc.	13	3	8	0	0,07	0	4,0	145	3	0	89	0,12	12	5,5
Forage de tunnels	45	2	0	91	0,33	12	3,3	45	2	0	91	2,1	9	2,0
Installation de carreaux acoustiques au plafond	42	2	45	50	0,01	23	7,5	21	1	0	100	0,81	25	2,8
Malaxage des ciments et mortiers	26	4	19	50	0,01	13	4,5	26	4	0	50	0,58	21	4,5
Meulage de joints de briques/pierres	82	7	12	12	0,26	5	7,7	63	5	0	16	1,4	5	4,5
Meulage de surfaces	213	5	0	99	0,07	6	8,6	213	5	0	99	1,2	8	7,7
Mise en place de coffrage à béton	159	3	0	98	0,02	9	5,5	156	2	0	100	0,53	6	2,8
Nettoyage	15	2	0	100	0,01	38	3,8	15	2	0	100	0,46	28	3,1

	Silice cristalline							Poussières						
	n ^A	n ^B	ND ^C (%)	SS ^D (%)	MG ^E (mg/m ³)	ETR ^F (%)	ETG ^G	n	nE	ND (%)	SS (%)	MG (mg/m ³)	ETR (%)	ETG
Tâche (suite)														
Perçage - Béton	45	8	31	36	0,06	12	10	27	5	0	52	1,8	18	2,9
Perçage - Pierre	122	3	0	98	0,03	11	3,9	122	3	0	98	0,98	8	2,5
Perçage - Sol et pierre	13	3	15	62	0,02	53	6,5	20	4	0	40	0,32	21	3,0
Ponçage	31	2	42	0	0,05	0	7,2	36	2	0	0	2,4	0	2,5
Projection de béton	94	2	0	87	0,02	12	3,5	94	2	0	87	2,4	8	2,4
Sciage de pièces de maçonnerie	81	10	5	56	0,10	8	4,7	70	9	0	51	1,9	9	5,1
Travaux de fondations	44	1	0	100	0,01	13	2,9	45	2	0	98	0,14	14	2,9
Travaux de maintenance électrique	41	1	0	100	0,01	13	2,5	41	1	0	100	0,71	9	1,8
Travaux d'excavation	56	1	0	100	0,01	17	4,1	57	2	0	98	0,19	17	4,4
Maîtrise à la source														
Arrosage/outil	52	9	19	21	0,07	5	3,6	39	7	10	0	0,52	0	2,9
Arrosage/surface	100	4	6	89	0,02	13	4,5	152	5	0	94	0,97	9	4,8
Arrosage/surface + isolation source								121	1	0	100	0,06	15	5,2
Ventilation locale	117	11	11	36	0,09	4	6,4	125	12	0	34	0,81	7	6,3
Aucun	726	22	3	79	0,08	3	9,7	672	18	0	85	1,8	3	4,7
Autre/Non précisé	471	19	10	68	0,03	5	7,4	457	17	0	70	0,50	5	5,6
Secteur d'activité														
Génie civil et voirie	838	16	3	89	0,02	4	5,4	984	14	0	93	0,42	4	5,1
Industriel, institutionnel et commercial	161	14	19	34	0,08	5	8,6	138	13	3	39	1,1	7	8,7
Résidentiel	35	4	37	0	0,13	0	5,0	27	2	0	0	1,6	0	2,5
Autre/Non précisé	432	14	7	55	0,22	4	7,8	417	14	0	54	3,3	4	4,9
Type de projet														
Construction nouvelle	823	13	1	97	0,02	4	5,8	996	13	0	98	0,43	4	5,6
Rénovation	194	18	21	6	0,07	2	9,2	127	11	2	0	0,95	0	4,6
Autre/Non précisé	449	16	10	51	0,19	3	8,2	443	16	1	51	3,2	4	4,8

	Silice cristalline							Poussières						
	n ^A	nE ^B	ND ^C (%)	SS ^D (%)	MG ^E (mg/m ³)	ETR ^F (%)	ETG ^G	n	nE	ND (%)	SS (%)	MG (mg/m ³)	ETR (%)	ETG
Environnement														
Extérieur	670	29	5	65	0,04	3	9,0	810	27	0,7	75	0,36	4	7,2
Intérieur	583	17	9	73	0,04	4	6,5	524	11	0	79	1,6	3	2,8
Non précisé	213	8	3	84	0,23	7	9,1	232	8	0	77	3,2	7	5,3
Ventilation (dilution)														
Non	474	29	10	49	0,20	3	7,1	532	25	1	64	1,1	4	12
Oui	535	6	1	91	0,03	5	6,0	588	7	0	92	0,85	4	3,5
Non précisé	457	15	9	70	0,03	5	7,7	446	13	0	72	0,53	5	5,6

^A Total des valeurs d’exposition individuelles

^B Nombre de sources dont sont tirées les valeurs d’exposition

^C Pourcentage de valeurs non détectées

^D Pourcentages de valeurs d’exposition individuelles simulées

^E Moyenne géométrique (médiane des 100 répétitions)

^F Écart-type relatif de la moyenne géométrique sur les 100 répétitions

^G Écart-type géométrique (médiane des 100 répétitions)

3.3 Modélisation statistique des niveaux d’exposition à la silice cristalline et poussières respirables

3.3.1 Résultats globaux

Le coefficient de détermination – ou R^2 – est une mesure traditionnellement utilisée pour décrire la qualité de l’ajustement d’un modèle aux données et la fraction de la variabilité des niveaux d’exposition expliquée par celui-ci. Pour chaque sous-banque, nous avons calculé la valeur du coefficient de détermination à partir du modèle le plus complet de l’ensemble de modèles, c’est-à-dire celui contenant toutes les variables et interactions. Puisque le modèle Tobit ne permet pas de calculer une valeur de R^2 , nous avons remplacé les valeurs non détectées en divisant par deux la valeur à la limite de détection [32] et ajusté un simple modèle de régression linéaire. Finalement, cette procédure a été répétée 20 fois pour tenir compte de la variabilité inhérente à la procédure de simulation des valeurs d’exposition individuelles. Les valeurs minimales, moyennes et maximales du coefficient de détermination estimé avec l’approche de substitution sur les 20 répétitions par analyse sont présentées au tableau 7. Le R^2 moyen pour l’analyse des données visant à comparer l’exposition à la silice cristalline à une valeur limite était de 22 %, alors qu’il était de 60 % pour les données associées aux tâches. Les coefficients de détermination obtenus avec les poussières étaient presque identiques à ceux pour la silice cristalline dans leurs analyses respectives.

Tableau 7 – Coefficients de détermination du modèle complet par analyse et contaminant

	Titre d’emploi		Tâche spécifique	
	Silice crist.	Poussières	Silice crist.	Poussières
Moyenne (%) ^A	22	21	60	60
Min-max (%) ^B	21–22	20–21	58–62	57–62

^A Valeur moyenne calculée sur 20 répétitions

^B Valeurs minimales et maximales des 20 répétitions

Le tableau 8 présente les cinq meilleurs modèles sur la base de leurs facteurs de pondération en fonction de l’analyse et de la nature du contaminant échantillonné. Pour l’analyse des niveaux d’exposition par titre d’emploi, la somme des facteurs de pondération des cinq meilleurs modèles pour la silice cristalline (sur 260) était de 67 % (moyenne des 20 répétitions). L’écart entre les facteurs de pondération de ces cinq modèles (de 7 à 25 %) était relativement faible, et suggère qu’aucun modèle ne s’est démarqué comme étant beaucoup plus approprié que les autres. Par ailleurs, le modèle le plus complet – utilisé pour le calcul du coefficient de détermination – avait un facteur de pondération moyen de 2 %, ce qui le plaçait au 10^e rang. Le portrait était similaire pour les poussières respirables avec un facteur de pondération total de 62 % pour les cinq meilleurs modèles.

Tableau 8 – Cinq meilleurs modèles Tobit pour les quatre sous-banques

Analyse	Titre d'emploi									
	Silice cristalline (260) ^A					Poussières (104)				
Contaminant	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Rang										
Titre d'emploi	X ^B	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Durée	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Année	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Secteur	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Type de projet ^C	X	X	X	X	X					
Stratégie	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Environnement			X			X	X	X	X	X
Maîtrise	X		X	X		X	X		X	X
Interaction Stratégie/Durée				X	X		X			
Interaction Stratégie/Année	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Interaction Environnement/Maîtrise ^C										
Facteur de pondération ^D (%)	25	15	10	10	7	33	12	9	4	4

Analyse	Tâche spécifique									
	Silice cristalline (80)					Poussières (80)				
Contaminant	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Rang										
Tâche	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Maîtrise à la source	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Durée	X	X	X				X		X	
Année	X	X		X	X			X	X	X
Secteur	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Type de projet	X		X		X	X	X	X	X	X
Environnement	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Ventilation générale	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Interaction Environnement/Ventilation	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Facteur de pondération (%)	94	6	0	0	0	31	26	18	12	3

^A Nombre de modèles de l'ensemble

^B Indique la présence d'une variable dans la structure du modèle

^C Variable et interaction exclues de l'analyse des données en poussières respirables

^D Valeur moyenne sur les 20 itérations

Pour les données visant à évaluer l'exposition à la silice cristalline lors d'une tâche spécifique, le modèle le plus complet avait un facteur de pondération de 94 %, et celui sans la variable du type de projet, 6 %. L'influence des 78 autres modèles sur les résultats était donc négligeable puisque l'estimation des effets des déterminants et des niveaux d'exposition standardisés était basée principalement sur un seul modèle. L'utilité de la procédure d'inférence multimodèle était

relativement limitée dans ce cas-ci. Ce résultat n’a pas été observé pour les poussières respirables, avec des valeurs de 31 % et de 26 % pour les deux meilleurs modèles. Le modèle contenant toutes les variables et le terme d’interaction a quant à lui obtenu un facteur de pondération moyen de 12 %.

3.3.2 Effets des déterminants de l’exposition

Cette section présente les effets des déterminants de l’exposition à l’exception du titre d’emploi et des tâches; ces derniers seront traités à la section suivante. Pour les variables nominales (p. ex. environnement, moyens de maîtrise), leurs effets sont présentés sous forme de pourcentages en tant qu’indices relatifs d’exposition [52] et calculés à partir des coefficients multimodèles. Pour chacune de ces variables, la catégorie de référence prend la valeur de 100 %. Une catégorie associée à une estimation supérieure à 100 % indique un effet à la hausse sur les niveaux d’exposition; à l’opposé, une valeur inférieure à 100 % indique une tendance à la baisse. Afin d’alléger le texte et en raison de leur interprétation limitée sur les niveaux d’exposition, les effets associés aux catégories identifiées « Non précisé » ne sont pas traités dans cette section. Pour les variables continues, soit la durée d’échantillonnage et l’année de l’évaluation, leurs effets sont exprimés de façon relative en pourcentage d’augmentation ou de diminution par incrément de la valeur de la variable. Les coefficients de régression obtenus par inférence multimodèle sont présentés à l’annexe 3 pour l’analyse de la banque « exposition par titre d’emploi », et à l’annexe 4 pour l’analyse de la banque « exposition durant une tâche ».

Analyse de la banque « exposition par titre d’emploi »

Les effets des déterminants à l’étude sur les niveaux d’exposition pour le quart de travail, accompagnés de leurs d’intervalles de confiance à 95 % sont présentés au tableau 9. La diminution des niveaux d’exposition à la silice cristalline associée à l’augmentation de 50 % de la durée d’échantillonnage (p. ex. de 300 à 450 minutes) était respectivement de 10 % et de 11 % pour les données de surveillance et d’évaluation de la conformité légale. Une différence marquée dans les tendances temporelles entre les deux stratégies d’échantillonnage a été observée, avec une augmentation de 9 % par an pour les données de surveillance, comparativement à une diminution de 17 % par an pour les données associées à l’évaluation de la conformité réglementaire. Pour ces dernières, une diminution beaucoup plus faible a été observée pour les poussières respirables avec une baisse de 2 % par an.

Pour l’interaction entre l’environnement et l’utilisation de moyen de maîtrise (sans égard au type en particulier) sur l’exposition à la silice cristalline, la combinaison de l’environnement extérieur/sans moyen de maîtrise a été sélectionnée comme niveau de référence (100 %). Un indice relatif de 84 % a été observé pour la combinaison extérieur/avec moyen de maîtrise, qui peut être interprété comme une diminution de 16 % des niveaux d’exposition liée à l’utilisation d’un moyen de maîtrise. À l’intérieur, la combinaison intérieur/sans moyen de maîtrise avait un indice relatif de 119 %, soit une augmentation de 19 % de l’exposition relativement au niveau de référence (extérieur/sans moyen de maîtrise). Un indice relatif de 98 % a été observé pour l’utilisation d’un moyen de maîtrise à l’intérieur. La différence entre la combinaison intérieur/avec moyen de maîtrise (98 %) et intérieur/sans moyen de maîtrise (119 %) indique une diminution de 21 % des concentrations associée à l’utilisation d’un moyen de maîtrise. L’interaction entre l’environnement et l’utilisation d’un moyen de maîtrise n’a pu être testée

pour les poussières respirables puisque certaines combinaisons de ces deux variables ne contenaient pas de mesures. L'analyse séparée de ces deux variables pour les poussières respirables a montré que les concentrations dans un environnement intérieur étaient près de quatre fois plus élevées qu'à l'extérieur, alors qu'une diminution de 21 % de l'exposition était associée à l'utilisation d'un moyen de maîtrise.

Tableau 9 – Effets estimés des déterminants de l'exposition (analyse par titre d'emploi)

Variable	Contaminant	
	Silice crist. Effet (%)	Poussières Effet (%)
Durée (+50%)^A		
Surveillance	90 [80;101] ^B	92 [82;104]
Conformité	89 [82;97]	93 [86;100]
Année^C		
Surveillance	109 [102;116]	106 [98;115]
Conformité	83 [78;89]	98 [92;104]
Secteur		
Génie Civil et voirie	Référence (100%)	
Industriel, institutionnel et Commercial	187 [110;318]	145 [96;220]
Résidentiel	146 [70;304]	135 [41;447]
Type de projet		
Rénovation	Référence (100%)	—
Nouvelle construction	55 [30;103]	—
Démolition	107 [66;174]	—
Interaction Environnement/ Moyen de maîtrise		
Extérieur/Sans moyen de maîtrise	Référence (100%)	—
Extérieur/Avec moyen de maîtrise	84 [58;121]	—
Intérieur/Sans moyen de maîtrise	119 [64;224]	—
Intérieur/Avec moyen de maîtrise	98 [53;181]	—
Environnement		
Extérieur	—	Référence (100%)
Intérieur	—	382 [193;755]
Moyen de maîtrise		
Sans moyen de maîtrise	—	Référence (100%)
Avec moyen de maîtrise	—	79 [52;119]

^A Effet de l'augmentation de 50% de la durée d'échantillonnage, stratifié par stratégie

^B Effet estimé et intervalle de confiance à 95% (valeurs moyennes sur les 20 itérations)

^C Tendence annuelle stratifiée par stratégie; année de référence : 1991

Analyse de la banque « exposition durant une tâche »

Les effets des déterminants de l’exposition à l’étude et leurs intervalles de confiance à 95 %, sont présentés au tableau 10. L’augmentation de 50 % de la durée d’échantillonnage était associée à une diminution des concentrations en silice cristalline respirable de 19 %. La tendance annuelle observée était une diminution de 11 % des niveaux d’exposition par an. Ces deux effets étaient beaucoup plus faibles et non-significatifs pour les poussières respirables : l’augmentation de 50 % de la durée de prélèvement était reliée à une diminution de 2 % des concentrations, et une tendance temporelle à la baisse de 1 % par année.

Tableau 10 – Effets estimés des déterminants de l’exposition (analyse par tâche spécifique)

Variable	Contaminant	
	Silice crist.	Poussières
	Effet (%)	Effet (%)
Durée (+50%) ^A	81 [75;87] ^B	98 [93;104]
Année ^C	89 [85;94]	99 [96;103]
Type de projet		
Nouvelle construction	Référence (100%)	
Rénovation	91 [55;152]	260 [121;557]
Secteur		
Génie Civil et voirie	Référence (100%)	
Industriel, institutionnel et commercial	56 [33;95]	77 [47;126]
Résidentiel	127 [57;283]	46 [18;122]
Moyen de maîtrise à la source		
Aucun	Référence (100%)	
Arrosage/surface	43 [23;79]	165 [101;267]
Arrosage/surface + isolation source	—	6 [3;13]
Arrosage/outil	29 [15;54]	12 [7;24]
Ventilation locale	31 [22;44]	19 [14;26]
Interaction Environnement/Ventilation générale		
Extérieur/Avec ventilation ^D	Référence (100%)	
Extérieur/Sans ventilation	3763 [2302;6150]	884 [537;1455]
Intérieur/Avec ventilation	1758 [1196;2585]	590 [426;817]
Intérieur/Sans ventilation	1789 [968;3308]	976 [545;1746]

^A Effet de l’augmentation de 50% de la durée d’échantillonnage

^B Effet estimé, intervalle de confiance à 95% (valeurs moyennes sur les 20 itérations)

^C Tendance annuelle, année de référence : 1988

^D La catégorie « Avec ventilation » pour l’environnement extérieur indique la présence de vents significatifs

Les moyens de maîtrise les plus efficaces pour réduire les niveaux d'exposition standardisés à la silice cristalline, relativement à la catégorie de référence « aucun », étaient l'arrosage intégré à l'outil avec une diminution de 71 %, et la ventilation locale par aspiration avec 69 %. L'arrosage du matériau était quant à lui associé à une diminution des niveaux d'exposition de 57 %. Les taux de réduction estimés étaient en général plus élevés pour les poussières respirables à l'exception de l'arrosage de la surface, qui était associée à une augmentation significative de l'exposition (65 %). Par ailleurs, l'arrosage du matériau combiné à l'isolation du travailleur de la source a obtenu l'efficacité estimée la plus élevée, mais cette catégorie n'était présente que pour les poussières respirables. Les données pour cette catégorie provenaient d'une seule publication, et impliquaient l'utilisation d'une cabine fermée (pressurisée ou non) sur différents types d'équipements routiers (niveleuses, racleuses et rétrocaveuses).

Les effets les plus importants ont été retrouvés avec l'interaction entre l'environnement et la ventilation générale, en particulier pour la silice cristalline. Les activités réalisées à l'extérieur en présence de vents significatifs – soit la catégorie de référence – étaient associées à des niveaux en silice cristalline et en poussières beaucoup plus faibles que pour les autres combinaisons présentes. Pour la silice cristalline, des niveaux 38 fois plus faibles ont été observés pour la combinaison extérieur/avec vent comparativement à la combinaison extérieur/sans vent. Quant à l'environnement intérieur, les niveaux d'exposition étaient 18 fois plus élevés relativement à la combinaison de référence (extérieur/avec vent), tant avec que sans ventilation mécanique.

3.3.3 Prédiction des niveaux d'exposition par titre d'emploi et par tâche

Exposition selon le titre d'emploi

Les prédictions de la moyenne géométrique par titre d'emploi, standardisées sur 8 h pour l'exposition à la silice cristalline respirable, accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %, sont présentées à la figure 3. La variabilité des MG prédites entre les répétitions de la procédure de simulation était relativement faible avec des ETR inférieurs à 3 % à l'exception des contremaîtres (6 %) et travailleurs souterrains (5 %).

Les fractions de dépassement de la valeur seuil (*Threshold limite value* ou TLV) de l'ACGIH (0,025 mg/m³) [53] et de la VEMP du RSST (0,1 mg/m³) [26] pour la silice cristalline – représentant par exemple la proportion de quarts de travail avec une exposition supérieure à ces seuils – sont présentées au tableau 11. Les fractions de dépassement ont été calculées à partir des moyennes géométriques prédites et en utilisant comme écart-type géométrique la valeur moyenne des erreurs résiduelles des 260 modèles, soit une valeur de 5,17. À l'exception de la catégorie « Autre », les fractions de dépassement de la TLV étaient toutes supérieures à 50 %, les plus élevées étant retrouvées chez les travailleurs souterrains et les couvreurs avec 91 % et 92 % (par exemple 9 journées de travail sur 10). Pour ces derniers, il s'agit de couvreurs faisant l'installation de toitures en plaques de béton, un revêtement qui n'est utilisé qu'exceptionnellement au Québec. En conséquence, les niveaux d'exposition prédits ne sont donc pas représentatifs de l'exposition de l'ensemble des couvreurs œuvrant dans le milieu québécois de la construction. Quant aux fractions de dépassement estimées de la VEMP québécoise, ceux-ci variaient entre 31 et 71 %. La valeur du coefficient de corrélation de

Spearman entre les MG prédites pour la silice et les poussières respirables était de 0,45 (valeur p de 0,23), indiquant un accord modéré.

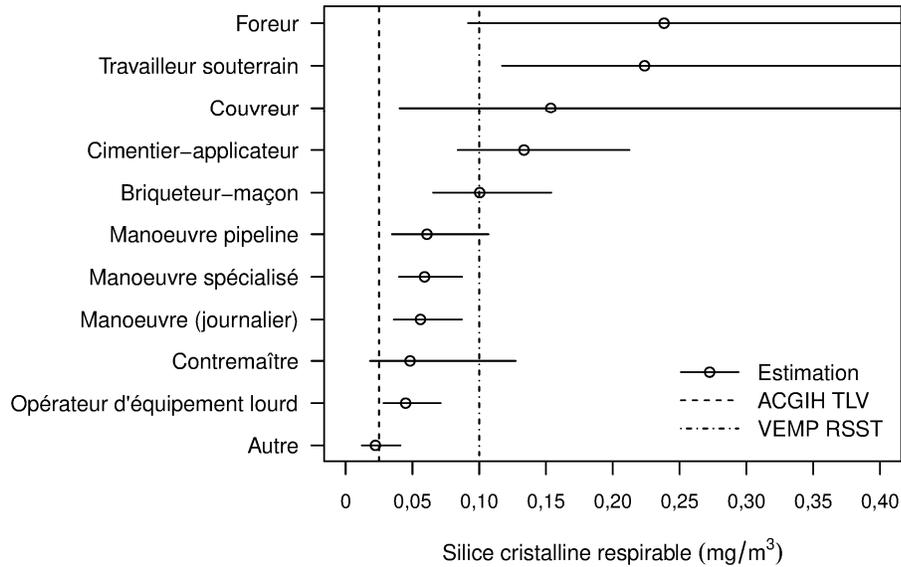


Figure 3 – Moyennes géométriques prédites pour l'exposition à la silice cristalline respirable par catégorie de titre d'emploi (avec intervalles de confiance à 95 %)

Tableau 11 – Prédictions des niveaux d'exposition standardisés et fractions de dépassement par catégorie de titre d'emploi

Contaminant Titre d'emploi	Silice cristalline			Poussières
	MG (mg/m ³) ^A	F.TLV(%) ^B	F.VEMP(%) ^C	MG (mg/m ³) ^D
Foreur	0,24	92	70	1,8
Travailleur souterrain	0,22	91	69	–
Couvreur	0,15	87	60	0,85
Cimentier-applicateur	0,13	85	57	2,9
Briqueur-maçon	0,10	80	50	2,0
Manœuvre pipeline	0,06	71	38	2,8
Manœuvre spécialisé	0,06	70	37	1,2
Manœuvre (journalier)	0,06	69	36	1,2
Contremaître	0,05	66	33	–
Opérateur d'équipement lourd	0,04	64	31	0,75
Autre	0,02	47	18	0,86
Chaudronnier	–	–	–	0,15

^A Prédiction de la moyenne géométrique de l'exposition à la silice cristalline respirable (moyenne des 20 itérations)

^B Fraction de dépassement de la valeur seuil de l'ACGIH

^C Fraction de dépassement de la VEMP du RSST

^D Prédiction de la moyenne géométrique de l'exposition aux poussières respirables (moyenne des 20 itérations)

Exposition selon la tâche exécutée

Pour les échantillons de silice cristalline, les MG prédites étaient supérieures à $0,025 \text{ mg/m}^3$ (la valeur seuil de l'ACGIH pour une exposition sur 8 heures) pour 11 des 27 catégories de tâches. Elles sont présentées à la figure 4, accompagnées de leurs intervalles de confiance à 95 %. L'ensemble des niveaux d'exposition moyens et des durées d'échantillonnage médianes par catégorie de tâche et par contaminant sont présentés au tableau 12.

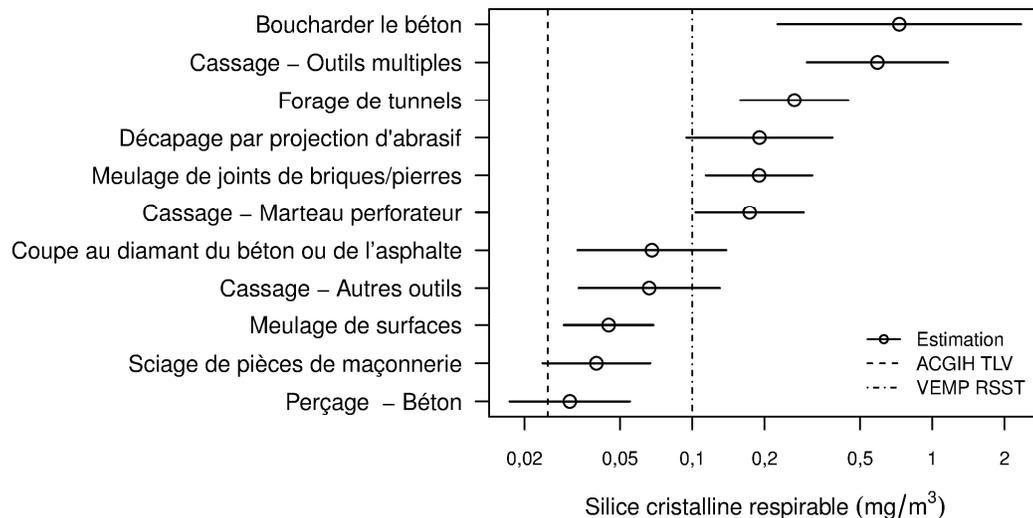


Figure 4 – Moyennes géométriques prédites pour l'exposition à la silice cristalline respirable par catégorie de tâche (avec intervalles de confiance à 95%)

La catégorie « boucharde le béton » présentait la MG prédite la plus élevée pour la silice cristalline avec $0,73 \text{ mg/m}^3$, en raison notamment de la durée médiane de prélèvement beaucoup plus courte (5 minutes) que les autres catégories. La tâche de boucharde était suivie de celle du cassage avec outils multiples (comprenant des marteaux perforateurs et/ou marteaux piqueurs) avec une moyenne géométrique de $0,59 \text{ mg/m}^3$. La tâche de cassage avec outils multiples était également associée à la deuxième MG prédite la plus élevée pour les poussières ($5,8 \text{ mg/m}^3$), après celle de décapage par projection d'abrasif ($6,8 \text{ mg/m}^3$). Pour le décapage par projection d'abrasif, la documentation des niveaux d'exposition associés à cette activité ne faisait pas partie des objectifs du projet de création de la banque de données. Des résultats d'échantillonnage pour cette tâche ont tout de même été saisis dans la banque de données s'ils accompagnaient des résultats d'exposition à la silice cristalline pour d'autres tâches dans les publications.

Les trois catégories impliquant une tâche de cassage figuraient parmi celles générant les plus fortes expositions pour la silice cristalline, avec des MG prédites entre $0,07 \text{ mg/m}^3$ (avec autres outils) et $0,59 \text{ mg/m}^3$ (avec outils multiples incluant l'utilisation de marteaux perforateurs/piqueurs). Par ailleurs, les tâches de ponçage ($1,9 \text{ mg/m}^3$) et d'installation de carreaux acoustiques au plafond ($2,3 \text{ mg/m}^3$) faisaient partie des cinq tâches avec les MG en poussières respirables prédites les plus élevées, alors que les prédictions correspondantes pour la silice cristalline respirable étaient égales ou inférieures à $0,02 \text{ mg/m}^3$.

En ce qui concerne les variations causées par la simulation des niveaux d'exposition, les ETR des MG en silice cristalline prédites par tâche variaient entre 5 % (Cassage - Marteau perforateur) et 47 % (Perçage de sol et de pierre) avec une médiane de 15 %. Pour les poussières respirables, l'ETR médian était de 18 % avec un minimum de 5 % (Cassage – autres outils) et un maximum de 37 % (Conduite d'équipement lourd).

L'accord entre les rangs des MG prédites pour les deux contaminants par catégorie de tâches était plus élevé que pour les catégories de titre d'emploi, avec un coefficient de corrélation de Spearman de 0,70 (valeur p inférieure à 0,01).

Tableau 12 – Moyennes géométriques prédites et durées d'échantillonnage médianes par catégorie de tâches

Tâche	Silice cristalline		Poussières	
	MG ^A (mg/m ³)	Durée ^B (min)	MG ^C (mg/m ³)	Durée (min)
Boucharder le béton	0,73	5	2,6	5
Cassage - Outils multiples (incluant marteaux perforateurs/piqueurs)	0,59	210	5,8	210
Forage de tunnels	0,27	390	1,7	390
Décapage par projection d'abrasif	0,19	315	6,8	315
Meulage de joints de briques/pierres	0,19	256	1,8	212
Cassage - Marteau perforateur	0,17	81	1,8	59
Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte	0,07	218	0,67	217
Cassage - Autres outils	0,07	104	0,87	89
Meulage de surfaces	0,04	309	1,7	309
Sciage de pièces de maçonnerie	0,04	210	1,3	210
Perçage - Béton	0,03	390	1,0	390
Déplacement mécanique de pierre, sol etc.	0,02	120	0,62	298
Démolition	0,02	334	0,58	334
Projection de béton	0,02	390	1,3	390
Perçage - Pierre	0,02	390	0,89	390
Ponçage	0,02	185	1,9	142
Mise en place de coffrage à béton	0,01	390	0,86	390
Déplacement manuel de petites pierres, sol etc.	0,01	212	–	–
Perçage - Sol et pierre	0,01	283	0,26	163
Installation de carreaux acoustiques au plafond	0,01	320	2,3	315
Travaux de maintenance électrique	0,01	390	0,65	390
Autres travaux routiers	0,01	350	0,29	350
Autres tâches reliées à la maçonnerie	<0,01	255	0,69	118
Nettoyage	<0,01	390	0,37	390
Travaux d'excavation	<0,01	341	0,32	341
Malaxage des ciments et mortiers	<0,01	336	0,79	336
Travaux de fondations	<0,01	356	0,22	356
Arrosage	–	–	0,34	228
Conduite d'équipement lourd	–	–	0,32	286

^A Prédiction de la moyenne géométrique de l'exposition à la silice cristalline respirable (moyenne des 20 itérations)

^B Valeur médiane de la durée d'échantillonnage par catégorie

^C Prédiction de la moyenne géométrique de l'exposition aux poussières respirables (moyenne des 20 itérations)

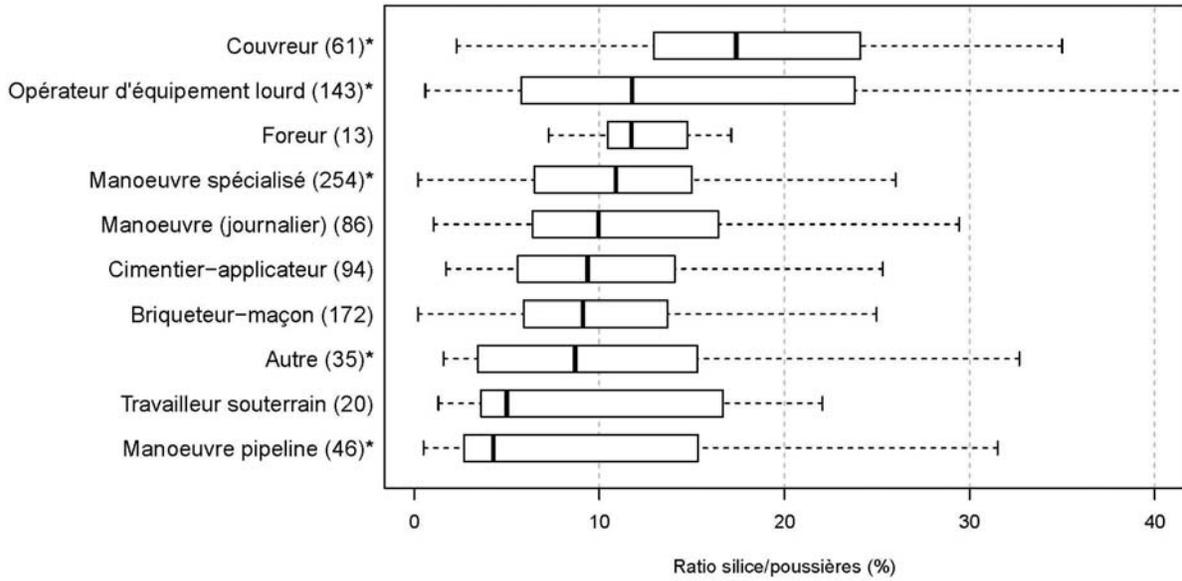
3.4 Analyse descriptive des pourcentages en silice cristalline

L’agrégation des sous-banques sur la base du contaminant échantillonné a permis de réunir respectivement 1618 et 1537 lignes de données d’exposition pour la silice cristalline et les poussières respirables. Parmi celles-ci, 1265 étaient des mesures uniques associées à la fois à un résultat en silice cristalline et un résultat en poussières respirables. De ce nombre, 339 résultats dont la concentration en silice cristalline respirable était sous la limite de détection ont été exclus. Deux autres résultats dont la concentration en silice cristalline était égale ou supérieure à la concentration en poussières ont également été exclus, portant le compte final à 924 lignes de données pour lequel un binôme silice cristalline / poussière respirable était disponible.

Une forte association entre les concentrations en silice et en poussières respirables a été observée, avec un coefficient de corrélation de Pearson de 0,92 (après transformation logarithmique des concentrations). Le pourcentage en silice cristalline médian sur les 924 lignes de données était de 11 % (intervalle interquartile 6 %-16 %, fourchette <1 %-95 %), et égal ou supérieur à 24 % pour une mesure sur 10. Les distributions des pourcentages en silice cristalline par catégorie de titre d’emploi, de tâche, d’outil, de matériau et de moyen de maîtrise à la source sont présentées sous la forme de diagrammes en boîte à moustache aux figures 5 à 9. De manière générale, les graphiques en boîte à moustache permettent d’illustrer la distribution d’un groupe de valeurs. Ils comprennent la « boîte », qui représente l’intervalle de la distribution où se concentrent la majorité des données (50 %), et les « moustaches », qui fournissent une mesure de l’étendue de la distribution.

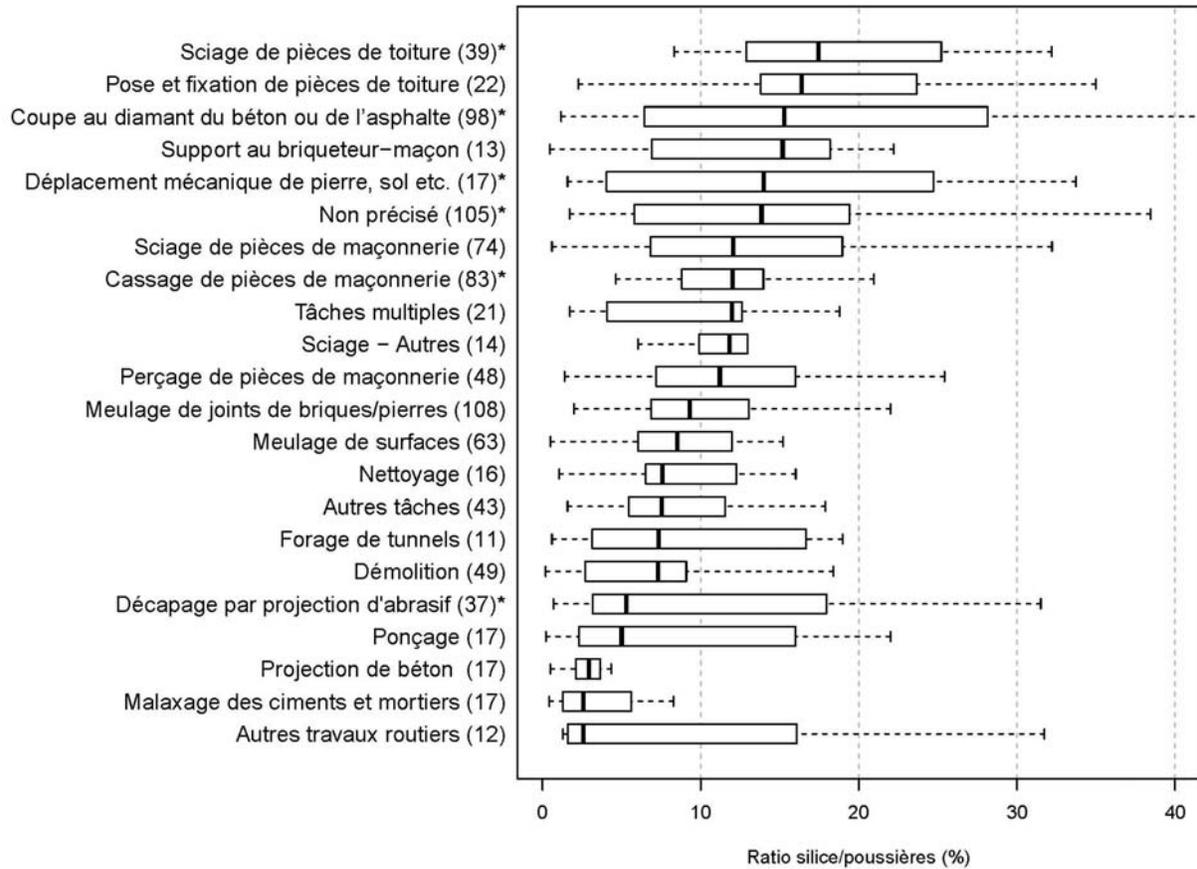
Plus précisément, les extrémités de la boîte pour chaque catégorie aux figures 5 à 9 indiquent l’intervalle entre le premier quartile (Q1), équivalent au 25^e centile de la distribution, et le troisième quartile (Q3) ou 75^e centile. La médiane de la distribution est quant à elle représentée par la ligne verticale qui sépare la boîte en deux. Pour ce qui est des extrémités (moustaches), la borne inférieure représente la plus petite valeur de la distribution supérieure à $[Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)]$, alors que la borne supérieure indique la valeur la plus élevée inférieure à $[Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)]$. Afin de faciliter la lecture des diagrammes, les valeurs extrêmes (qui seraient à l’extérieur des moustaches) n’ont pas été représentées dans les figures 5 à 9. Par ailleurs, les catégories contenant au moins un échantillon dont le pourcentage en silice cristalline était égal ou supérieur à 50 % sont identifiées par un astérisque. Les 10^e, 25^e, 50^e, 75^e et 90^e centiles par catégorie de titre d’emploi, de tâche, d’outil, de matériaux et de moyen de maîtrise à la source sont présentés à l’annexe 3.

Le pourcentage médian en silice cristalline pour le titre d’emploi de couvreur (17 %) était beaucoup plus élevé que ceux des autres titres d’emploi. Toutes les mesures pour cette catégorie étaient liées aux tâches de sciage de pièces de toiture et de pose et fixation de pièces de toiture, avec des médianes de 17 % et 16 %, respectivement. Pour les matériaux, le sable (19 %) et l’asphalte (17 %) ont obtenu les pourcentages médians les plus élevés. Les mesures pour cette dernière catégorie étaient toutes liées à la tâche de coupe au diamant du béton ou de l’asphalte et à l’utilisation d’une fraiseuse routière. Le pourcentage médian en silice cristalline le plus faible a été observé pour la catégorie de matériau « carreau acoustique » avec 2 % (fourchette 1 %-3 %).



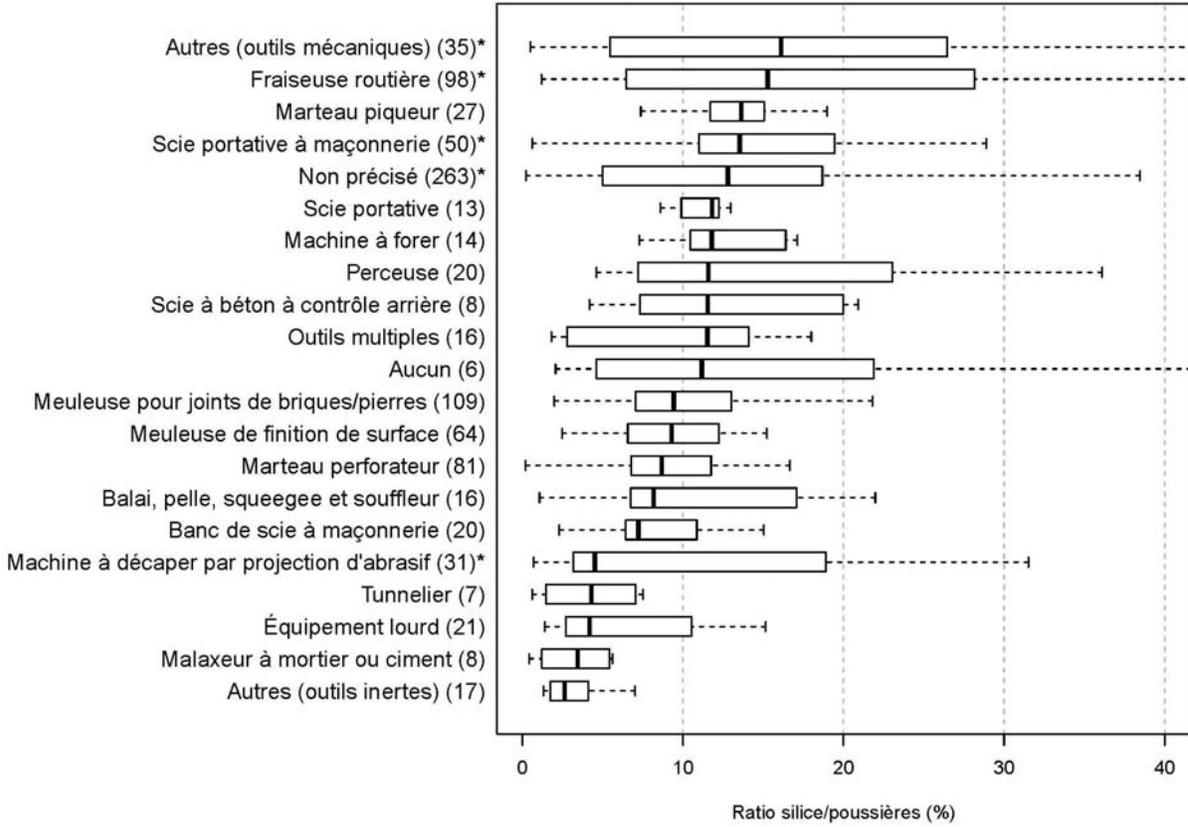
*La catégorie contient au moins un échantillon dont la teneur en silice cristalline des poussières respirables est égale ou supérieure à 50%.

Figure 5 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de titre d’emploi



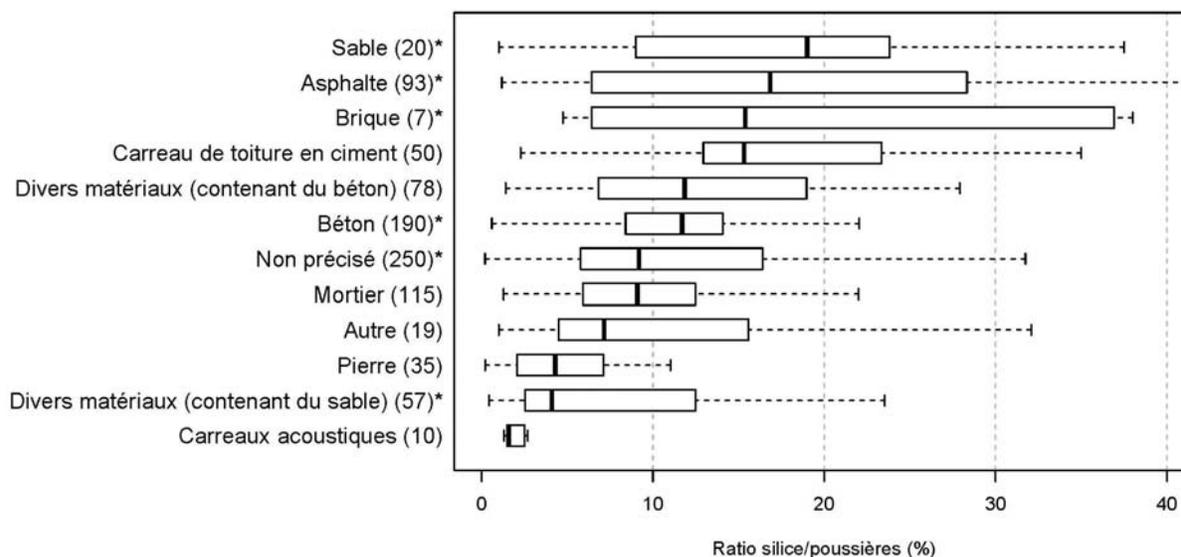
*La catégorie contient au moins un échantillon dont la teneur en silice cristalline des poussières respirables est égale ou supérieure à 50%.

Figure 6 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de tâche



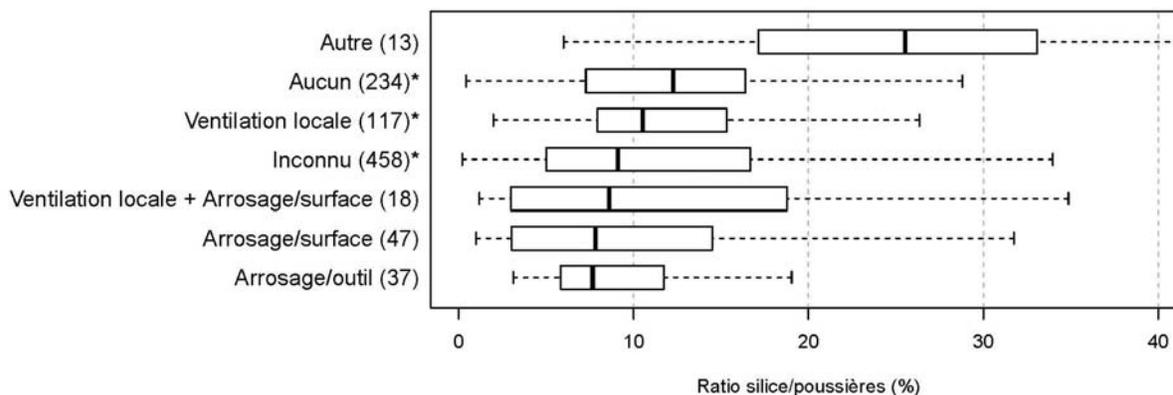
*La catégorie contient au moins un échantillon dont la teneur en silice cristalline des poussières respirables est égale ou supérieure à 50%.

Figure 7 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie d’outil



*La catégorie contient au moins un échantillon dont la teneur en silice cristalline des poussières respirables est égale ou supérieure à 50%.

Figure 8 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de matériau



*La catégorie contient au moins un échantillon dont la teneur en silice cristalline des poussières respirables est égale ou supérieure à 50%.

Figure 9 – Pourcentages en silice cristalline respirable par catégorie de moyen de maîtrise à la source

4. DISCUSSION

4.1 Données d'exposition retenues

Le processus de sélection de données a permis de retenir 3155 des 6118 lignes de la banque de données, soit 52 %, pour nos analyses. La proportion de lignes de données retenues était plus faible pour les analyses en fonction de la nature de la tâche exécutée, principalement en raison de l'exclusion des mesures réalisées lors d'études expérimentales que nous avons considérées comme n'étant pas représentatives des conditions de travail sur les chantiers. Ces études visaient surtout à évaluer l'efficacité de moyens de maîtrise et à optimiser des paramètres tel le débit d'eau ou d'aspiration en contrôlant les sources de variabilité environnementales (p. ex. vitesse du vent, environnement de travail fixe). L'utilisation d'instruments à lecture directe dans le but d'obtenir des mesures « avant/après » était également fréquente dans ce type d'étude.

Une différence majeure entre les sous-banques en fonction du type de mesure concerne la proportion de mesures uniques, qui était beaucoup plus élevée pour les données de silice cristalline visant à comparer l'exposition à une VLE selon le titre d'emploi (83 %) que pour les données par tâche (29 %). La vaste majorité de nos données pour l'exposition selon le titre d'emploi provenait soit de la banque de données de Flanagan et coll. [8] (constituée seulement de mesures uniques) ou de rapports de recherche d'organismes publics. Pour ces derniers, la plupart des documents fournissaient des résultats détaillés en annexes pour chacun des échantillons récoltés au cours de l'étude. Pour l'analyse des niveaux d'exposition associés aux tâches, les articles de périodiques scientifiques formaient la source principale des mesures, où les résultats synthétisés sous forme de tableaux sont fréquemment utilisés en raison de contraintes d'espace.

Comparativement à la banque de données de Flanagan et coll., nos analyses ont permis de couvrir une période temporelle près de deux fois plus longue (1988-2007, comparativement à 1992-2002) et une gamme plus large de tâches, de titres d'emploi et de moyens de maîtrise à la source. Nous estimons qu'approximativement 47 % et 64 % des valeurs d'exposition de l'analyse en fonction du titre d'emploi étaient partagées respectivement avec cette source de données pour la silice cristalline et les poussières; ces proportions étaient beaucoup plus faibles pour les tâches, soit 2 %.

4.2 Traitement des données d'exposition présentées sous forme de paramètres de synthèse

Les analyses réalisées à partir de la banque de données d'exposition à la silice cristalline représentent 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. [27] 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 pour les deux sous-banques contenant les mesures de silice cristalline avec 17 % (titres d'emplois) et 71 % (tâches). La variabilité des MG entre les simulations dans nos analyses était relativement faible avec des ETR par catégorie généralement en deçà de 20 %; seules quelques catégories de tâches avaient des ETR supérieurs à 30 %. La variabilité des

estimations en utilisant 100 répétitions de la procédure de simulation dans notre étude était comparable à celle obtenue par Lavoué et coll. qui, elle, a été réalisée avec 1000 répétitions.

Bien que la validation de la méthode de simulation ne fasse pas partie de nos objectifs, nos résultats confirment que celle-ci permet d’exploiter les données d’exposition de la littérature rapportées sous différents formats à l’aide d’approches statistiques habituellement réservées aux mesures individuelles. De plus, la variabilité due à la nature probabiliste de la simulation Monte Carlo était relativement faible même en utilisant un nombre de répétitions modéré. Nos résultats confirment la faisabilité de l’approche méta-analytique proposée par Lavoué et coll. [27].

4.3 Modélisation statistique des niveaux d’exposition

4.3.1 Résultats globaux

La valeur moyenne relativement faible (22 %) du coefficient de détermination du modèle le plus complet pour l’analyse des données en silice cristalline associées à l’exposition sur le quart de travail suggère que le titre d’emploi n’est pas un très fort prédicteur des niveaux d’exposition. Le R^2 moyen était toutefois comparable aux coefficients de détermination obtenus dans certaines autres analyses de banques de données d’exposition professionnelle, dont Flanagan et coll. [8] (29 %), Lavoué et coll. [54] (29 % pour les effets fixes) et Lavoué et coll. [23] (21 %).

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 à la silice cristalline avec une moyenne de 60 %. Cette proportion est comparable à de nombreuses études recensées par Burstyn et Teschke [28] et suggère que les facteurs associés à l’exposition sont relativement bien définis par la modélisation statistique. La différence entre les coefficients de détermination obtenus avec les deux analyses suggère 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 moyens de maîtrise à la source des poussières – à l’intérieur du quart de travail. Par contre, puisque les tâches exécutées peuvent varier d’une journée à l’autre, l’évaluation en fonction du titre d’emploi demeure une approche appropriée pour l’estimation des risques pour la santé d’une exposition à long terme et à des fins de conformité aux valeurs limites.

4.3.2 Effets des déterminants de l’exposition

Durée d’échantillonnage

L’augmentation de 50 % de la durée de prélèvement était associée à une baisse des niveaux d’exposition en silice cristalline de 10 % à 19 % entre les données de tâches, de conformité réglementaire et celles plutôt associées à la surveillance. La littérature indique que ces tendances à la baisse peuvent être dues à l’inclusion de périodes sans exposition, par exemple des pauses et des tâches ou des procédés de nature secondaire, pour les mesures associées à une durée d’échantillonnage plus longue [52,55]. L’inclusion de périodes sans exposition durant l’échantillonnage a effectivement été rapportée dans certaines sources de données de la sous-banque concernant les tâches [56,57].

L'effet de la durée d'échantillonnage était plus faible pour les mesures de poussières respirables, en particulier pour les données associées aux tâches. Une explication possible peut être que, dans certains cas, l'exposition à la silice cristalline est intermittente durant la période échantillonnée alors que l'exposition à des poussières peut également se produire au cours de travaux impliquant des matériaux qui ne contiennent pas de silice. Les informations contenues dans la banque de données ne permettent toutefois pas de vérifier cette hypothèse.

Tendances temporelles

Les analyses des tendances temporelles de l'exposition à des contaminants chimiques en milieu de travail indiquent que les niveaux sont généralement à la baisse depuis au moins les 50 dernières années [58,59] en raison notamment d'une meilleure maîtrise des facteurs (p. ex. administratifs, économiques ou technologiques) associés à l'exposition [60]. Cette tendance a été observée dans nos analyses avec une diminution des niveaux en silice cristalline de 11 % par année pour les tâches et de 17 % pour les données d'évaluation de la conformité réglementaire. Les données associées à la stratégie de surveillance ont toutefois montré une augmentation de 9 % des niveaux d'exposition à la silice cristalline par année. Les tendances annuelles différentes entre les deux stratégies d'échantillonnage pour l'analyse en fonction du titre d'emploi ont également été observées avec la modélisation des données de poussières respirables. Il est possible que ces tendances relevées puissent être dues à des facteurs qui n'ont pas été inclus dans le processus de modélisation. 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.

Moyens de maîtrise à la source

Tous les types de moyens de maîtrise présents dans l'analyse des niveaux d'exposition basée sur les tâches étaient associés à une diminution des concentrations en silice cristalline, en particulier la ventilation locale (69 %) et l'utilisation d'un procédé humide intégré à l'outil (71 %). Les effets estimés pour ces deux catégories étaient légèrement plus faibles que ceux retrouvés dans les études – pour la plupart de devis expérimental – recensées par Beaudry et coll. [24]. Or, ce type d'étude implique généralement le contrôle des sources de variabilité environnementale pour ajuster certains paramètres (p. ex. débit d'air/eau, étanchéité) afin d'obtenir une efficacité maximale pour ces dispositifs. Nos résultats indiquent donc que ces équipements demeurent très efficaces pour réduire les concentrations en silice cristalline respirable dans des conditions réelles d'utilisation tout en tenant compte des effets simultanés d'autres déterminants de l'exposition par la modélisation.

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 – par exemple certains dispositifs d'arrosage avec des outils électriques. Par ailleurs, la maîtrise de l'exposition à la silice cristalline respirable ne se limite pas seulement aux moyens techniques, mais inclut également la substitution et les bonnes pratiques de travail. Le lecteur est invité à consulter la publication R-692 de l'IRSST par Beaudry et coll. pour une revue exhaustive et détaillée des mesures générales de prévention et moyens de maîtrise techniques spécifiques à certains outils [24].

Autres facteurs associés à l’exposition

Les effets liés 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 généralement liés à des niveaux d’exposition plus élevés dans nos analyses, comparativement à la catégorie de référence Génie civil et voirie. Certaines particularités de ce secteur, notamment une proportion importante de travailleurs autonomes et de petites entreprises dont les ressources dédiées en santé et en sécurité du travail sont relativement moindres que dans les autres secteurs [61-63], peuvent expliquer en partie ces résultats.

L’utilisation de moyens de maîtrise dans l’analyse des données visant à comparer l’exposition à une VLE a été évaluée de façon plus sommaire que pour les tâches, en raison du manque d’information sur le type de moyen employé pour une grande proportion des données d’exposition. Les effets observés allaient dans la direction anticipée avec des niveaux d’exposition plus faibles avec l’utilisation d’un moyen de maîtrise et dans un environnement extérieur.

Pour l’analyse des tâches, il a été possible d’évaluer les effets de la présence ou de l’absence de ventilation mécanique à l’intérieur et l’influence du vent à l’extérieur. Les niveaux d’exposition les plus faibles étaient liés à l’environnement extérieur en présence de vents significatifs, soit la catégorie de référence, alors que l’absence de vent était associée à des concentrations en silice cristalline 38 fois plus élevées. L’impact du vent sur l’exposition a également été relevé par l’étude de Forest et Tremblay [10] avec une baisse de la moyenne arithmétique des concentrations en quartz respirable de $0,25 \text{ mg/m}^3$ à $0,05 \text{ mg/m}^3$ avec un vent de 30 km/h lors de l’utilisation de marteaux-piqueurs. Pour l’environnement intérieur, nos résultats ont montré que les niveaux d’exposition étaient 18 fois plus élevés relativement à la combinaison de référence (extérieur/avec vent), avec et sans ventilation générale. L’influence de la ventilation sur l’exposition était beaucoup moins importante dans l’environnement intérieur comparativement à l’extérieur. Cette observation pour l’environnement intérieur diffère de la diminution de 66 % des niveaux d’exposition en silice cristalline liée à la ventilation mécanique observée dans une étude expérimentale sur le meulage de surface [64], et de 25 % pour l’utilisation de marteaux perforateurs à l’intérieur de bétonnières [65]. Compte tenu des contrastes importants entre les effets pour les combinaisons des variables d’environnement et de ventilation, une répartition égale des différentes circonstances a été intégrée dans les prédictions des niveaux d’exposition par tâche.

4.3.3 Prédications des niveaux d'exposition par titre d'emploi et par tâche

Exposition selon le titre d'emploi

Les fractions de dépassement (représentant la probabilité de surexposition) de la VLE de l'ACGIH par titre d'emploi, estimées à partir des niveaux d'exposition à la silice cristalline respirable standardisés sur huit heures, étaient de loin supérieures au seuil d'acceptabilité de 5 % pour les 11 catégories à l'étude. Ainsi, à l'exception de la catégorie « Autre », les fractions de dépassement par titre d'emploi étaient toutes supérieures à 50 % – ce qui représente au moins un quart de travail sur deux associé à une exposition trop élevée. Pour la VEMP québécoise ($0,1 \text{ mg/m}^3$), les fractions de dépassement pour ces mêmes titres d'emploi étaient supérieures à 30 %. Les fractions de dépassement estimées ne tenaient toutefois pas compte de la variabilité de l'exposition potentiellement différente entre les titres d'emploi, étant donné que la même valeur d'écart-type géométrique a été utilisée pour toutes les catégories. Les fractions de dépassement calculées en utilisant les ETG estimés par catégorie, présentées à l'annexe 1, ont donné des résultats similaires.

Nos résultats indiquent que les titres d'emploi de foreur et de travailleur souterrain sont particulièrement à risque d'être surexposés, avec des MG standardisées sur huit heures deux fois plus élevées que la norme québécoise et des fractions de dépassement de 92 %. L'incertitude quant à l'estimation des niveaux d'exposition pour les foreurs était relativement élevée puisque cette catégorie comportait la taille d'échantillon la plus faible avec 12 mesures. Pour les travailleurs souterrains, ce groupe a été identifié comme étant le plus à risque de surexposition lors de la première analyse de la banque de données par Beaudry et coll. [24]. Ces auteurs ont également relevé que l'exposition secondaire peut être importante pour ce groupe, puisque les niveaux moyens les plus élevés étaient retrouvés chez des arpenteurs œuvrant à proximité d'un tunnelier.

Les MG prédites pour les cimentiers-applicateurs, les briqueteurs-maçons et les couvreurs se situaient entre 1 et 1,5 fois la norme québécoise. Les mesures de la banque de données pour les couvreurs effectuant le sciage et la pose de pièces de toiture en béton ne sont pas représentatives de l'exposition pour ce titre d'emploi au Québec puisque ce type de toiture n'est retrouvé qu'exceptionnellement dans la province. Les données chez les briqueteurs-maçons et les cimentiers applicateurs étaient, quant à elles, associées à une gamme de tâches variées, certaines avec un potentiel d'exposition élevé selon la littérature tel le meulage de joints de briques et de surfaces.

Exposition selon la tâche exécutée

Les niveaux d'exposition à la silice cristalline 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 supérieurs à la norme québécoise pour six catégories sur 27. Il est important de noter que ces deux valeurs limites sont basées sur une journée de 8 heures, mais que la comparaison des niveaux d'exposition estimés pour les tâches à ces valeurs limites permet tout de même d'identifier les tâches les plus susceptibles de contribuer à l'exposition sur le quart de

travail. Les estimations allaient pour la plupart dans la direction anticipée, avec les tâches telles que le décapage par projection d’abrasif, 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 figuraient parmi les plus faibles.

Certaines tâches évaluées sont associées à un seul titre d’emploi selon les conventions collectives régissant le secteur de la construction du Québec. C’est le cas, par exemple, du meulage de joints de brique pour le métier de briqueteur-maçon, et du forage de tunnels pour l’occupation de 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 huit heures. Par ailleurs certains titres d’emploi sont associés à un large éventail de travaux, en particulier les occupations exclusives telles les manœuvres pipelines, spécialisés et journaliers. Par exemple, le manœuvre pipeline peut effectuer autant le décapage par projection d’abrasif que le contrôle de la circulation, deux tâches associées à des niveaux d’exposition fort différents. Les 357 mesures de silice cristalline pour le titre d’emploi de manœuvre spécialisé étaient associées à 15 catégories de tâches dont 12 étaient représentées dans l’analyse des niveaux d’exposition selon la tâche. Les résultats obtenus pour l’analyse des tâches permettent ainsi de mieux définir le portait de l’exposition sur le quart de travail pour ces titres d’emploi.

4.3.4 Comparaison entre les niveaux d’exposition en silice cristalline et en poussières respirables

La corrélation entre les MG prédites pour la silice cristalline et les poussières était beaucoup plus forte pour les catégories de tâches que pour les titres d’emploi. Cette différence suggère que l’analyse des niveaux en poussières respirables peut fournir une indication de la distribution entre les tâches les plus exposées à la silice cristalline et celles moins exposées. Les tâches de ponçage, d’installation de carreaux acoustiques et de projection de béton avaient des niveaux standardisés en silice cristalline relativement faibles comparativement aux prédictions pour les poussières respirables. Pour la tâche de ponçage, 15 des 31 mesures étaient associées à la catégorie de matériau « Gypse et matériau à joints » pour les deux contaminants et provenaient d’une publication américaine [66]. L’analyse de huit types de composés à joints réalisée dans le cadre de cette étude a révélé la présence de traces de silice dans deux échantillons; l’utilisation de composés à joints sans silice cristalline est par ailleurs recommandée par OSHA [67]. Pour la tâche de projection de béton, la nature humide du matériau et l’utilisation d’air comprimé pour ce procédé expliqueraient en partie les écarts entre les MG prédites par contaminant.

Pour les pourcentages en silice cristalline respirable calculés sur 924 échantillons, la valeur médiane (11 %) était comparable à la moyenne de 12 % basée sur 68 mesures réalisées par Tjoe Nij et coll. [68]. Les écarts entre les pourcentages médians par catégorie pour les cinq variables à l’étude étaient relativement faibles, variant entre 5 % et 15 % pour la majorité des catégories. Les contrastes étaient sensiblement plus importants entre les différentes catégories de matériau, dont les médianes variaient entre 2 % (carreaux acoustiques) et 19 % (sable). Le pourcentage élevé pour le sable était fort probablement lié à la composition géologique même de ce matériau, à forte teneur en quartz. Les données de la littérature indiquent que la teneur en silice cristalline des poussières respirables est généralement plus faible que celle du matériau brut ou des

poussières déposées [1,69,70], ce qui complique la prédiction des concentrations en silice à partir de la nature du matériau. L'évaluation de la relation entre les pourcentages en silice cristalline dans les échantillons de poussières respirables et la teneur en silice du matériau en vrac n'a par ailleurs pas été réalisée dans nos analyses puisque l'information sur des résultats d'analyse de la composition du matériau n'était pas disponible pour la vaste majorité des mesures.

Pour les mesures chez les couvreurs, titre d'emploi avec la médiane des pourcentages la plus élevée, la valeur médiane de 17 % était similaire aux résultats d'analyse de la teneur en silice des dépôts de poussières des tuiles de béton associés à ces mesures dans la banque de données, qui variaient entre 17 % et 26 % selon l'étude. Le contenu en silice cristalline des poussières était également relativement élevé pour la coupe au diamant du béton et de l'asphalte avec 15 %, et peut être dû en partie aux conditions environnementales dans lesquelles les projets de voirie sont réalisés (conditions sèches et chaudes) [8]. La stratification des résultats pour cette catégorie par moyen de maîtrise indique que le pourcentage est effectivement plus faible avec l'arrosage intégré à la fraiseuse (6 %, n=19) comparativement à l'absence d'un moyen de maîtrise (28 %, n=28).

Bien que des contrastes importants aient été observés entre les médianes des pourcentages en silice cristalline respirable pour les catégories des déterminants à l'étude, la variabilité dans les pourcentages retrouvés au sein d'une même catégorie était importante pour la majorité de celles-ci. Cette variabilité suggère que les mesures gravimétriques de poussières ont une utilité relativement limitée dans la surveillance environnementale de l'exposition à la silice dans l'industrie de la construction. L'utilisation du 90^e centile de la distribution des pourcentages par catégorie, présentés à l'annexe 5, combinée aux concentrations en poussières respirables, pourrait néanmoins fournir une indication des niveaux d'exposition en silice cristalline tout en tenant compte de l'incertitude associée à la grande variabilité dans la composition des poussières observée dans nos résultats.

Finalement, la teneur en silice cristalline des poussières et leurs concentrations ne sont que deux des facteurs associés au développement d'effets délétères sur la santé respiratoire, en particulier pour les particules dont la taille se rapproche de l'échelle nanométrique. Parmi ceux-ci, notons la réactivité de surface et la morphologie des particules, ainsi que l'interaction entre la silice cristalline et d'autres substances dans les poussières [71,72]. Ces paramètres demeurent toutefois peu étudiés dans le contexte de l'industrie de la construction : seulement deux sources de la banque de données (sur 115) ont également caractérisé la morphologie des poussières par microscopie électronique [68,73]. Par ailleurs, une étude récente a permis entre autres de quantifier le nombre, la masse et la distribution des particules à l'échelle nanométrique lors de la préparation d'asphalte et de béton en laboratoire [74]. Compte tenu de l'avancement des connaissances quant à la toxicité des particules ultrafines (PUF) contenant de la silice, et du développement des appareils de mesure, des recherches portant sur la caractérisation spécifique de l'exposition des travailleurs de la construction à ce type de particules sont à prévoir dans un avenir rapproché.

4.4 Limites

4.4.1 Limites reliées au manque de documentation des facteurs associés à l’exposition

L’utilisation de données d’exposition professionnelle provenant de la littérature a présenté de nombreux défis quant à l’analyse et à l’interprétation des résultats au cours de cette étude. Parmi ceux-ci, les descriptions pour des paramètres tels l’utilisation de moyens de maîtrise, l’environnement de travail et le type de projet et de chantier étaient manquantes pour approximativement 33 % des mesures de silice cristalline associées aux tâches, et pour 66 % des mesures de l’analyse par titre d’emploi. Ces proportions auraient été encore plus élevées sans les restrictions aux lignes de données dont le titre d’emploi ou la tâche et la durée d’échantillonnage étaient disponibles, et dont la qualité des informations sur les déterminants et la métrologie était au minimum acceptable. Certains paramètres potentiellement associés à l’exposition, tels la teneur en silice du matériau en vrac et la présence d’une source d’exposition secondaire, étaient trop faiblement documentés pour être inclus dans le processus de modélisation. Pour la variable de l’environnement de travail, son influence sur les niveaux d’exposition n’a pu être évaluée que selon une dichotomie extérieur/intérieur, éliminant la distinction entre les espaces clos, restreints et fermés en raison de tailles d’échantillon insuffisantes pour certaines de ces catégories. Il est probable que certaines mesures associées à la catégorie « non-précisé » aient été réalisées dans ces environnements, et une analyse plus détaillée aurait été rendue possible par la documentation plus rigoureuse de ce paramètre dans les sources de données. La variable reliée aux moyens de maîtrise des poussières pour l’analyse des niveaux d’exposition par titre d’emploi a également dû être restreinte à une dichotomie « avec » ou « sans » moyens de maîtrise pour cette même raison.

La problématique liée aux paramètres descriptifs manquants associés aux niveaux d’exposition a également été relevée pour des banques de données d’exposition professionnelle telles IMIS⁸ [75-77] ainsi que pour les articles de périodiques scientifiques [78-80]. Les méthodes basées sur l’imputation multiple [81] sont utilisées avec succès depuis plus de 30 ans dans les sciences sociales, médicales et économiques [82] pour surmonter les difficultés liées à l’analyse d’ensembles de données comportant des informations manquantes pour les variables d’intérêt. L’imputation multiple a été récemment appliquée dans le domaine de l’hygiène du travail dans le traitement des concentrations non détectées [83], mais, à notre connaissance, ce n’est pas encore le cas dans le traitement de la description manquante des facteurs reliés à l’exposition. L’application de ces méthodes aux analyses de la banque de données permettrait d’approfondir les conclusions sur les facteurs contribuant à l’exposition à la silice cristalline sur les chantiers, en particulier pour l’exposition sur le quart de travail en fonction du titre d’emploi.

4.4.2 Limites reliées à la représentativité et à la distribution des données d’exposition

Bien que la banque de données contienne l’essentiel des données d’exposition à la silice cristalline associées à des activités de construction rapportées dans la littérature au cours de deux dernières décennies, certaines circonstances associées à l’exposition étaient sous-représentées.

⁸ Integrated Management Information System : Banque de données contenant des résultats d’échantillonnages réalisés par OSHA

Par exemple, le titre d'emploi de foreur et la tâche de bouchardage du béton, qui atteignaient les niveaux d'exposition à la silice cristalline standardisés les plus élevés dans leurs analyses respectives, avaient également les tailles d'échantillons les plus faibles avec 12 mesures chacune. Le faible nombre de mesures pour ces catégories augmente l'incertitude associée aux résultats et, dans le cas du bouchardage du béton, la durée d'échantillonnage médiane très courte (5 minutes) comparativement aux autres tâches complique l'interprétation des niveaux observés pour cette tâche. En outre, seulement 2 % des mesures d'évaluation de tâches spécifiques provenaient du secteur résidentiel, qui compte pour plus du tiers des salariés œuvrant dans l'industrie de la construction au Québec [84]. De plus, certaines conditions de travail rencontrées dans les analyses ne sont peut-être pas nécessairement représentatives de celles présentes sur les chantiers québécois, par exemple les données d'exposition chez les couvreurs mentionnées à la section précédente.

Une des contraintes majeures rencontrées dans l'analyse des niveaux d'exposition associés aux tâches a été la répartition très inégale des données entre les catégories des différentes variables. Ainsi, la forte association entre la tâche exécutée et les catégories d'outil et de matériau a empêché l'inclusion de ces trois variables séparément dans le processus de modélisation. Cette forte association découle en partie de la nature même de la tâche; par exemple, le meulage de joints de brique comporte presque exclusivement l'utilisation d'une meuleuse pour joints de brique. L'inclusion de variables fortement liées dans un modèle peut causer des problèmes de colinéarité qui augmentent l'incertitude associée à l'estimation des effets. Au même titre que les problèmes liés au manque de documentation de certains paramètres dans la banque, la distribution inégale des données a limité le nombre et le type de variables incluses dans le processus de modélisation.

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 [85] révèle que ceux-ci peuvent être liés à la sélection des milieux de travail évalués et à la stratégie d'échantillonnage. Une approche permettant de tenir compte de l'hétérogénéité dans les devis et les conditions entre les études, et de la corrélation potentielle des mesures provenant d'une même étude, consiste à utiliser des modèles linéaires avec la source de données en tant qu'effet aléatoire, une approche indiquée pour l'analyse des données provenant de la littérature [86,87]. Ce type de modèle n'a pas été utilisé dans nos analyses puisque les résultats pour certaines combinaisons de variables n'étaient issus que d'une seule source de données. Des difficultés similaires liées à l'inclusion de la source de données comme effet aléatoire ont été relevées par Hein et coll. lors de la modélisation statistique d'expositions professionnelles aux hydrocarbures aromatiques et aux solvants chlorés provenant de la littérature [29,88]. L'analyse séparée de l'évaluation de l'exposition par tâche spécifique et par quart de travail (en fonction du titre d'emploi) et, pour cette dernière, la distinction entre la stratégie de conformité réglementaire et les autres stratégies pour les mesures sur un quart de travail ont toutefois 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-norme [89,90] contrairement aux autres

stratégies de mesure. Les moyennes d'exposition pour les titres d'emplois sur huit heures ont donc été estimées en donnant une part égale aux effets liés aux deux stratégies d'échantillonnage.

5. 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. Cette dynamique peut potentiellement mener à une sous-estimation de la fréquence et de l'intensité de l'exposition à des poussières contenant de la silice chez les travailleurs de la construction. 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. En particulier, les taux d'efficacité estimés pour les moyens de maîtrise à la source atteignaient jusqu'à 71 % (pour les dispositifs d'arrosage intégrés à l'outil), en tenant compte des effets de la tâche exécutée, de la durée de l'échantillonnage et des autres variables associées à l'exposition. Nos résultats indiquent également que la variabilité associée à l'estimation des moyennes géométriques et des paramètres de régression due à la méthode de Monte-Carlo est relativement faible et ce, en utilisant un nombre modéré de répétitions.

D'après nos estimations, les niveaux d'exposition sur un quart de travail de huit heures dépassent la valeur de l'ACGIH et la norme réglementaire québécoise avec une fréquence bien supérieure au seuil qui est généralement considéré comme acceptable, suggérant que la majorité des travailleurs de cette industrie sont à risque de développer des maladies professionnelles liées à la silice cristalline à long terme. Les modèles élaborés 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 à la source des poussières 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. Les résultats de la modélisation statistique des mesures en poussières respirables étaient comparables à ceux obtenus pour les mesures de silice cristalline quant aux niveaux d'expositions par titre d'emploi et par tâche. La prédiction des concentrations en silice à partir des poussières échantillonnées demeure toutefois difficile en raison d'une variabilité importante dans les pourcentages en silice cristalline par catégorie de matériaux, d'outils, de titres d'emplois et de tâches, en dépit de différences moyennes marquées entre les catégories. Finalement, la poursuite de la surveillance par des mesures quantitatives de l'exposition est nécessaire, entre autres pour pallier au manque de connaissances quant à l'influence de certains déterminants sur les concentrations en silice cristalline, et pour suivre l'évolution des tendances temporelles.

BIBLIOGRAPHIE

1. IARC (1997) IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Silica, some silicates, coal dust and para-Aramid fibrils. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, Lyon. Vol. 68
2. IARC (2012) IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. A review of human carcinogens. Part C: Arsenic, metals, fibres, and dusts. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, Lyon. Vol. 100
3. Cunningham, J.G. (1934) Silicosis. *Journal de l'Association Médicale Canadienne*, vol. 30, n° 2, p. 176-179
4. Brown, H.V. (1965) The History of Industrial Hygiene: A Review with Special Reference to Silicosis. *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 26, n° 3, p. 212-226
5. Middleton, E.L. (1929) The Present Position Of Silicosis In Industry In Britain. *British Medical Journal*, vol. 2, n° 3584, p. 485-489
6. Pontaut, A. (1985) Santé et sécurité : un bilan du régime québécois de santé et sécurité du travail, 1885-1985. Boréal express, Montréal, QC
7. Steenland, K. (2010) *Epidemiology of silica-related disease*. Dans: Hunter's Diseases of Occupations, 10th Ed., P.J. Baxter; T.-C. Aw; A. Cockcroft; P. Durrington; J.M. Harrington (Réd.). Hodder Arnold, London, UK
8. Flanagan, M.E.; 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*, vol. 3, n° 3, p. 144-152
9. Rappaport, S.M.; Goldberg, M.; Susi, P.; Herrick, R.F. (2003) Excessive Exposure to Silica in the US Construction Industry. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 47, n° 2, p. 111-122
10. Forest, J.; Tremblay, C. (2007) 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, QC
11. Tjoe Nij, E.; de Meer, G.; Smit, J.; Heederik, D. (2003) Lung Function Decrease in Relation to Pneumoconiosis and Exposure to Quartz-Containing Dust in Construction Workers. *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 43, n° 6, p. 574-583

12. 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. Carex Canada, School of Environmental Health, University of British Columbia, Vancouver, BC
13. NIOSH (2008) Work-related lung disease surveillance report, 2007. Division of Respiratory Disease Studies, Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, Morgantown, WV
14. Mazurek, J.M.; Attfield, M.D. (2008) Silicosis Mortality Among Young Adults in the United States, 1968-2004. *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 51, n° 8, p. 568-578
15. CSST (2010) Répartition des décès inscrits et acceptés en relation avec la silice selon le secteur d'activité économique et l'année d'inscription du décès (1995-2009), Direction de la comptabilité et de la gestion de l'information; Service de la statistique. CSST, Montréal, QC
16. Gouvernement du Québec (2003) Projet de règlement, Règlement ministériel d'application de la Loi sur la santé publique. *Gazette officielle du Québec*, 30 avril 2003, vol. 18, p. 2256-2260
17. Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec (2011) Rapport des maladies et intoxications d'origine chimique déclarées au Québec de 2005 à 2010. Direction de la protection de la santé publique, Ministère de la Santé et des Services sociaux, Québec, QC
18. Moore, M. (1999) Crystalline Silica: Occurrence and Use. *Indoor and Built Environment*, vol. 8, n° 2, p. 82-88
19. Gouvernement de l'Ontario (2004) Directives concernant l'exposition à la silice sur les chantiers de construction. Ministère du travail, Toronto, ON
20. U.S. Geological Survey; Branch of Industrial Minerals (1992) Crystalline silica primer. United States Bureau of Mines, Reston, VA
21. CSST (2012) Plan d'action construction. Site Web consulté le 7 mai 2012. http://www.csst.qc.ca/publications/900/Pages/dc_900_9119.aspx
22. CSST (2010) Plan stratégique 2010-2014. Site Web consulté le 26 mars 2012. http://www.csst.qc.ca/publications/300/Pages/DC_300_1020.aspx
23. Lavoué, J.; Gérin, M.; Bégin, D.; Ostiguy, C.; Arcand, R.; Adib, G. (2012) Valorisation des données d'exposition professionnelle mesurées au Québec depuis 1980 par les équipes du Réseau public québécois en santé au travail – Étude préliminaire. Rapport R-723. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Montréal, QC

24. 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. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Montréal, QC. Disponible au : <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-692.pdf>
25. Dahmann, D.; Taeger, D.; Kappler, M.; Buchte, S.; Morfeld, P.; Bruning, T.; Pesch, B. (2008) Assessment of exposure in epidemiological studies: the example of silica dust. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 18, n° 5, p. 452-461
26. Gouvernement du Québec (2012) Règlement sur la santé et la sécurité du travail c. S-2.1, r. 13. Éditeur officiel du Québec, Québec, QC
27. 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*, vol. 51, n° 2, p. 161-172
28. Burstyn, I.; Teschke, K. (1999) Studying the Determinants of Exposure: A Review of Methods. *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 60, n° 1, p. 57-72
29. Hein, M.J.; Waters, M.A.; Ruder, A.M.; Stenzel, M.R.; Blair, A.; Stewart, P.A. (2010) Statistical modeling of occupational chlorinated solvent exposures for case-control studies using a literature-based database. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, n° 4, p. 459-472
30. Esmen, N.A.; Hammad, Y.Y. (1977) Log-normality of environmental sampling data. *Journal of Environmental Science and Health Part A: Environmental Science and Engineering*, vol. 12, n° 1-2, p. 29-41
31. Helsel, D.R. (2005) *Nondetects and data analysis : statistics for censored environmental data*. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ
32. Hornung, R.W.; Reed, L. (1990) Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 5, n° 1, p. 46-51
33. Gaffney, S.H.; Panko, J.M.; Unice, K.M.; Burns, A.M.; Kreider, M.L.; Gelatt, R.H.; Booher, L.E.; Paustenbach, D.J. (2011) Occupational exposure to benzene at the ExxonMobil Refinery in Baytown, TX (1978-2006). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 21, n° 2, p. 169-185
34. Anderson, D.R. (2008) *Model based inference in the life sciences : a primer on evidence*. Springer, New York ; London
35. Burnham, K.P.; Anderson, D.R. (2002) *Model selection and multimodel inference : a practical information-theoretic approach*. Springer, New York, NY

-
36. Lavoué, J.; Droz, P.O. (2009) Multimodel Inference and Multimodel Averaging in Empirical Modeling of Occupational Exposure Levels. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 53, n° 2, p. 173-180
 37. 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*, vol. 8, n° 1, p. 38-48
 38. Hurvich, C.M.; Tsai, C.-L. (1989) Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, vol. 76, n° 2, p. 297-307
 39. Ye, M.; Meyer, P.D.; Neuman, S.P. (2008) On model selection criteria in multimodel analysis. *Water Resources Research*, vol. 44, n° 3, p. W03428
 40. Lukacs, P.; Burnham, K.; Anderson, D. (2010) Model selection bias and Freedman's paradox. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, vol. 62, n° 1, p. 117-125
 41. Lubin, J.H.; Colt, J.S.; Camann, D.; Davis, S.; Cerhan, J.R.; Severson, R.K.; Bernstein, L.; Hartge, P. (2004) Epidemiologic Evaluation of Measurement Data in the Presence of Detection Limits. *Environmental Health Perspectives*, vol. 112, n° 17, p. 1691-1696
 42. Tobin, J. (1958) Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables. *Econometrica*, vol. 26, n° 1, p. 24-36
 43. Maciejewska, A. (2008) Occupational Exposure Assessment for Crystalline Silica Dust: Approach in Poland and Worldwide. *International Journal of Occupational Medicine & Environmental Health*, vol. 21, n° 1, p. 1-23
 44. Kauffer, E.; Moulut, J.C.; Masson, A.; Protois, J.C.; Grzebyk, M. (2002) Comparison by X-ray Diffraction and Infrared Spectroscopy of Two Samples of α Quartz with the NIST SRM 1878a α Quartz. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 46, n° 4, p. 409-421
 45. Madsen, F.A.; Rose, M.C.; Cee, R. (1995) Review of Quartz Analytical Methodologies: Present and Future Needs. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 10, n° 12, p. 991-1002
 46. 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*, vol. 45, n° 1, p. 43-54
 47. Lee, T.; Kim, S.W.; Chisholm, W.P.; Slaven, J.; Harper, M. (2010) Performance of High Flow Rate Samplers for Respirable Particle Collection. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, n° 6, p. 697-709
 48. Vincent, J.H. (2007) *Aerosol Sampling: Science, Standards, Instrumentation and Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, UK

49. R Development Core Team (2012) R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing. Vienna
50. Antweiler, R.C.; Taylor, H.E. (2008) Evaluation of Statistical Treatments of Left-Censored Environmental Data using Coincident Uncensored Data Sets: I. Summary Statistics. *Environmental Science & Technology*, vol. 42, n° 10, p. 3732-3738
51. WHO (1995) Report on the Second Workshop on Reliable Evaluation of Low-Level Contamination of Food, 26 - 27 May 1995, Kulmbach, Federal Republic of Germany. GEMS/Food-EURO, Geneva
52. Lavoué, J.; Vincent, R.; Gérin, M. (2006) Statistical Modelling of Formaldehyde Occupational Exposure Levels in French Industries, 1986-2003. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 50, n° 3, p. 305-321
53. ACGIH (2010) *Silica, Crystalline - α -Quartz and Cristobalite*. Dans: Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances, 7th Ed, American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, OH
54. Lavoué, J.; Vincent, R.; Gérin, M. (2008) Formaldehyde Exposure in U.S. Industries from OSHA Air Sampling Data. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 5, n° 9, p. 575-587
55. Kolstad, H.A.; Sønderskov, J.; Burstyn, I. (2005) Company-Level, Semi-Quantitative Assessment of Occupational Styrene Exposure when Individual Data are not Available. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 49, n° 2, p. 155-165
56. Nash, N.T.; Williams, D.R. (2000) Occupational Exposure to Crystalline Silica During Tuck-Pointing and the Use of Engineering Controls. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 15, n° 1, p. 8-10
57. Croteau, G.A.; Flanagan, M.E.; Camp, J.; Seixas, N.S. (2004) The Efficacy of Local Exhaust Ventilation for Controlling Dust Exposures During Concrete Surface Grinding. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 48, n° 6, p. 509-518
58. Symanski, E.; Kupper, L.L.; Hertz-Picciotto, I.; Rappaport, S.M. (1998) Comprehensive evaluation of long-term trends in occupational exposure: Part 2. Predictive models for declining exposures. *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 55, n° 5, p. 310-316
59. Creely, K.S.; Van Tongeren, M.; While, D.; Soutar, A.J.; Tickner, J.; Agostini, M.; de Vocht, F.; Kromhout, H.; Graham, M.; Bolton, A.; Cowie, H.; Cherrie, J.W. (2006) Trends in inhalation exposure - Mid 1980s till present. HSE Books, Norwich, UK
60. 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*, vol. 44, n° 5, p. 325-327

61. Darragh, A.R.; Stallones, L.; Bigelow, P.L.; Keefe, T.J. (2004) Effectiveness of the HomeSafe Pilot Program in Reducing Injury Rates Among Residential Construction Workers, 1994–1998. *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 45, n° 2, p. 210-217
62. Mayhew, C.; Quinlan, M. (1997) Subcontracting and occupational health and safety in the residential building industry. *Industrial Relations Journal*, vol. 28, n° 3, p. 192-205
63. Methner, M.M.; McKernan, J.L.; Dennison, J.L. (2000) Task-Based Exposure Assessment of Hazards Associated with New Residential Construction. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 15, n° 11, p. 811-819
64. Akbar-Khanzadeh, F.; Milz, S.A.; Wagner, C.D.; Bisesi, M.S.; Ames, A.L.; Khuder, S.; Susi, P.; Akbar-Khanzadeh, M. (2010) Effectiveness of Dust Control Methods for Crystalline Silica and Respirable Suspended Particulate Matter Exposure During Manual Concrete Surface Grinding. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 7, n° 12, p. 700-711
65. Almaguer, D.; Schulman, S.; Echt, A. (2001) Control technology for ready-mix truck drum cleaning. Report EPHB 247-19. National Institute of Occupational Safety and Health, Division of Applied Research and Technology, Engineering and Physical Hazards Branch, Cincinnati, OH
66. Miller, A.K.; Esswein, E.J.; Allen, J. (1997) NIOSH Health Hazard Evaluation Report: Center to Protect Workers' Rights, Washington, D.C. Report HETA 94-0078-2660. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH
67. OSHA (2009) Controlling Silica Exposures in Construction. OSHA 3362-04. Occupational Safety and Health Administration, Washington, DC
68. 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*, vol. 46, n° suppl 1, p. 71-76
69. Chisholm, J. (1999) Respirable Dust and Respirable Silica Concentrations from Construction Activities. *Indoor and Built Environment*, vol. 8, n° 2, p. 94-106
70. Fulekar, M.H. (1999) Occupational Exposure to Dust in Quartz Manufacturing Industry. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 43, n° 4, p. 269-273
71. Donaldson, K.; Borm, P.J.A. (1998) The Quartz Hazard: A Variable Entity. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 42, n° 5, p. 287-294
72. Napierska, D.; Thomassen, L.; Lison, D.; Martens, J.; Hoet, P. (2010) The nanosilica hazard: another variable entity. *Particle and Fibre Toxicology*, vol. 7, n° 1, p. 39

73. Tjoe Nij, E.; Hohr, D.; Borm, P.; Burstyn, I.; Spierings, J.; Steffens, F.; Lumens, M.; Spee, T.; Heederik, D. (2004) Variability in Quartz Exposure in the Construction Industry: Implications for Assessing Exposure-Response Relations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 1, n° 3, p. 191-198
74. Asadi, S.; Hassan, M.M.; Dylla, H. (2012) Characterization of Nano Particles Released During Asphalt and Concrete Laboratory Activities [Résumé de conférence], *Construction Research Congress 2012*. West Lafayette, IN
75. Gomez, M.R. (1997) Factors Associated with Exposure in Occupational Safety and Health Administration Data. *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 58, n° 3, p. 186-195
76. Melville, R.; Lippmann, M. (2001) Influence of Data Elements in OSHA Air Sampling Database on Occupational Exposure Levels. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 16, n° 9, p. 884-899
77. Teschke, K.; Marion, S.A.; Vaughan, T.L.; Morgan, M.S.; Camp, J. (1999) Exposures to Wood Dust in U.S. Industries and Occupations, 1979 to 1997. *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 35, n° 6, p. 581-589
78. Bakke, B.; Stewart, P.A.; Waters, M.A. (2007) Uses of and Exposure to Trichloroethylene in U.S. Industry: A Systematic Literature Review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 4, n° 5, p. 375-390
79. Caldwell, D.J.; Armstrong, T.W.; Barone, N.J.; Suder, J.A.; Evans, M.J. (2001) Lessons Learned While Compiling a Quantitative Exposure Database from the Published Literature. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 16, n° 2, p. 174-177
80. Pronk, A.; Coble, J.; Stewart, P.A. (2009) Occupational exposure to diesel engine exhaust: A literature review. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 19, n° 5, p. 443-457
81. Rubin, D.B. (1996) Multiple Imputation After 18+ Years. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 91, n° 434, p. 473-489
82. Schafer, J.L. (1999) Multiple imputation: a primer. *Statistical Methods in Medical Research*, vol. 8, n° 1, p. 3-15
83. Krishnamoorthy, K.; Mallick, A.; Mathew, T. (2009) Model-Based Imputation Approach for Data Analysis in the Presence of Non-detects. *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 53, n° 3, p. 249-263
84. Commission de la construction du Québec (2012) *Statistiques annuelles de l'industrie de la construction 2012*. Commission de la construction du Québec, Direction recherche et organisation, Montréal, QC

85. Lavoué, J. (2006) Évaluation de l'exposition professionnelle au formaldéhyde à partir de sources de données préexistantes. Thèse présentée à la Faculté des études supérieures en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en Santé publique, option Toxicologie de l'environnement, Département de santé environnementale et santé au travail. Université de Montréal, Montréal, QC
86. Berkey, C.S.; Hoaglin, D.C.; Mosteller, F.; Colditz, G.A. (1995) A random-effects regression model for meta-analysis. *Statistics in Medicine*, vol. 14, n° 4, p. 395-411
87. Thompson, S.G.; Sharp, S.J. (1999) Explaining heterogeneity in meta-analysis: a comparison of methods. *Statistics in Medicine*, vol. 18, n° 20, p. 2693-2708
88. Hein, M.J.; Waters, M.A.; van Wijngaarden, E.; Deddens, J.A.; Stewart, P.A. (2008) Issues When Modeling Benzene, Toluene, and Xylene Exposures Using a Literature Database. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 5, n° 1, p. 36-47
89. Froines, J.; Wegman, D.; Eisen, E. (1989) Hazard Surveillance in Occupational Disease. *American Journal of Public Health*, vol. 79 Supplement, p. 26-31.
90. Yassin, A.; Yebesi, F.; Tingle, R. (2005) Occupational Exposure to Crystalline Silica Dust in the United States, 1988–2003. *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, n° 3, p. 255-260

ANNEXES

ANNEXE 1. PARAMÈTRES ESTIMÉS POUR L'EXPOSITION SUR LE QUART DE TRAVAIL

Variable	Silice cristalline			Poussières		
	β^A	ES ^B	ETR ^C (%)	β^D	ES	ETR (%)
Constante	-2,185	0,967	3	-0,016	1,001	335
Durée (ln(min))	-0,261	0,150	4	-0,195	0,149	4
Année (-1991)	0,083	0,034	2	0,058	0,043	3
Titre d'emploi						
Autre	-0,975	0,271	1	-0,317	0,193	1
Briqueteur-maçon	0,530	0,154	3	0,536	0,149	0
Chaudronnier				-2,052	0,588	6
Cimentier-applicateur	0,815	0,168	5	0,890	0,175	0
Contremaître	-0,206	0,464	29			
Couvreur	0,989	0,703	3	0,260	0,621	4
Foreur	1,809	0,499	0	1,292	0,516	0
Manœuvre (journalier)	-0,054	0,162	37	-0,029	0,162	5
Manœuvre pipeline	0,030	0,243	28	0,847	0,232	0
Manœuvre spécialisé	Référence			Référence		
Opérateur d'équipement lourd	-0,274	0,192	4	-0,459	0,183	3
Travailleur souterrain	1,264	0,370	3			
Secteur d'activité						
Génie civil et voirie	Référence			Référence		
Industriel, institutionnel et commercial	0,628	0,270	2	0,374	0,212	2
Résidentiel	0,379	0,374	7	0,302	0,611	2
Non précisé	0,629	0,281	2	-0,123	0,184	1
Type de projet						
Construction nouvelle	-0,593	0,316	4			
Démolition	0,071	0,248	25			
Rénovation	Référence					
Non précisé	-0,598	0,581	3			

Variable	Silice cristalline			Poussières		
	β^A	ES ^B	ETR ^C (%)	β^D	ES	ETR (%)
Stratégie d'échantillonnage						
Conformité réglementaire	2,684	0,913	2	0,815	0,937	5
Surveillance	Référence			Référence		
Environnement						
Extérieur	Référence			Référence		
Intérieur	0,177	0,321	11	1,339	0,348	1
Non précisé	0,310	0,636	7	0,528	0,472	1
Maîtrise (utilisation)						
Non	Référence			Référence		
Oui	-0,173	0,187	11	-0,236	0,211	8
Non précisé	0,018	0,268	55	0,054	0,211	9
Interaction Durée:Stratégie						
Durée (ln(min)) : Conformité	-0,036	0,140	19	0,016	0,127	38
Interaction Année:Stratégie						
Année (-1991)/Conformité	-0,271	0,046	1	-0,078	0,061	2
Interaction Environnement:Maîtrise						
Intérieur/Avec maîtrise	-0,021	0,156	38			
Intérieur/Non précisé	0,079	0,504	5			
Non précisé/Avec maîtrise	-0,164	0,625	11			
Non précisé/Non précisé	-0,061	0,431	14			

^A Estimation pondérée sur 260 modèles, moyenne des 20 répétitions

^B Erreur standard inconditionnelle, moyenne des 20 répétitions

^C Écart-type relatif de l'estimation pondérée sur les 20 répétitions

^D Estimation pondérée sur 104 modèles, moyenne des 20 répétitions

ANNEXE 2. PARAMÈTRES ESTIMÉS POUR L’EXPOSITION SELON LA TÂCHE EXÉCUTÉE

Variable	Silice cristalline			Poussières		
	β^A	ES ^B	ETR ^C (%)	β	ES	ETR (%)
Constante	-1,23	0,569	14	-0,832	0,454	14
Durée (ln(min))	-0,513	0,092	5	-0,041	0,070	38
Année (-1988)	-0,112	0,025	11	-0,009	0,018	58
Tâche						
Arrosage				-1,66	0,446	18
Autres tâches reliées à la maçonnerie	-2,32	0,432	8	-0,948	0,373	18
Autres travaux routiers	-2,09	0,266	10	-1,77	0,251	7
Boucharder le béton	0,667	0,587	23	0,248	0,615	52
Cassage - Autres outils	-0,168	0,365	66	-0,723	0,360	12
Cassage - Marteau perforateur	0,668	0,312	13	-0,013	0,299	1391
Cassage - Outils multiples (incluant marteaux perforateurs/piqueurs)	2,37	0,357	7	1,20	0,314	12
Conduite d'équipement lourd				-1,21	0,342	30
Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte	0,656	0,421	19	-0,414	0,533	52
Décapage par projection d'abrasif	1,42	0,380	22	1,33	0,345	25
Démolition	-0,809	0,295	37	-1,12	0,258	26
Déplacement manuel de petites pierres, sol etc.	-1,34	0,498	12			
Déplacement mécanique de pierre, sol etc	-1,09	0,453	17	-1,02	0,269	11
Forage de tunnels	1,25	0,264	12	-0,002	0,231	5002
Installation de carreaux acoustiques au plafond	-1,64	0,295	19	0,273	0,301	97
Malaxage des ciments et mortiers	-2,44	0,328	9	-0,784	0,282	25
Meulage de joints de briques/pierres	1,35	0,294	8	0,017	0,366	1191
Meulage de surfaces		Référence			Référence	
Mise en place de coffrage à béton	-0,996	0,173	13	-0,678	0,152	13
Nettoyage	-2,38	0,446	15	-1,56	0,408	19
Perçage - Béton	-0,270	0,328	99	-0,527	0,341	40

Variable	Silice cristalline			Poussières		
	β^A	ES ^B	ETR ^C (%)	β	ES	ETR (%)
Tâche (suite)						
Perçage - Pierre	-0,921	0,207	18	-0,643	0,181	17
Perçage - Sol et pierre	-1,69	0,411	23	-1,94	0,304	12
Ponçage	-1,32	0,394	15	0,093	0,349	97
Projection de béton	-0,859	0,328	20	-0,266	0,280	57
Sciage de pièces de maçonnerie	-0,315	0,285	34	-0,311	0,271	37
Travaux de fondations	-2,01	0,249	13	-1,53	0,233	10
Travaux de maintenance électrique	-1,84	0,273	9	-0,967	0,239	16
Travaux d'excavation	-2,17	0,267	11	-1,14	0,218	8
Moyen de maîtrise à la source						
Arrosage/outil	-1,24	0,318	6	-2,09	0,329	5
Arrosage/surface + isolation source				0,498	0,246	29
Arrosage/surface	-0,847	0,310	25	-2,82	0,397	9
Ventilation locale	-1,17	0,182	5	-1,67	0,167	9
Aucun	Référence			Référence		
Autre/Non précisé	0,140	0,381	63	-0,787	0,328	14
Secteur d'activité						
Génie civil et voirie	Référence			Référence		
Industriel, institutionnel et commercial	-0,574	0,268	12	-0,265	0,253	61
Résidentiel	0,238	0,409	36	-0,772	0,494	27
Autre/Non précisé	1,74	0,299	9	0,557	0,513	27
Type de projet						
Construction nouvelle	Référence			Référence		
Rénovation	-0,093	0,260	107	0,954	0,389	21
Autre/Non précisé	-0,813	0,340	23	0,671	0,540	21

Variable	Silice cristalline			Poussières		
	β^A	ES ^B	ETR ^C (%)	β	ES	ETR (%)
Environnement						
Extérieur	Référence			Référence		
Intérieur	2,87	0,197	5	1,77	0,166	4
Non précisé	1,19	1,406	12	0,663	1,231	13
Ventilation						
Non	3,63	0,251	3	2,18	0,254	5
Oui	Référence			Référence		
Non précisé	2,32	0,408	6	1,46	0,337	7
Interaction Environnement:Ventilation						
Intérieur/Sans ventilation	-3,61	0,303	4	-1,52	0,330	13
Intérieur/Non précisé	-4,10	0,349	4	-1,15	0,289	8
Non précisé/Sans ventilation	-2,72	1,447	8	-1,76	0,923	13
Non précisé/Non précisé	-0,971	1,412	15	-1,17	0,900	13

^A Estimation pondérée sur 80 modèles, moyenne des 20 répétitions

^B Erreur standard inconditionnelle, moyenne des 20 répétitions

^C Écart-type relatif de l'estimation pondérée sur les 20 répétitions

ANNEXE 3. POURCENTAGES DE SILICE CRISTALLINE RESPIRABLE ASSOCIÉS AUX TITRES D’EMPLOI, TÂCHES, OUTILS, MATÉRIAUX ET MOYENS DE MAÎTRISE

	n ^A	nE ^B	P10 ^C	P25 ^D	Méd ^E	P75 ^F	P90 ^G
Titre d'emploi							
Couvreur	61	4	10%	13%	17%	24%	48%
Opérateur d'équipement lourd	143	14	3%	6%	12%	24%	35%
Foreur	13	3	10%	11%	12%	15%	17%
Manœuvre spécialisé	254	22	3%	7%	11%	15%	22%
Manœuvre (journalier)	86	6	3%	7%	10%	16%	23%
Cimentier-applicateur	94	8	3%	6%	9%	14%	20%
Briqueteur-maçon	172	10	4%	6%	9%	14%	19%
Autre	35	8	2%	3%	9%	15%	29%
Travailleur souterrain	20	3	2%	4%	5%	16%	19%
Manœuvre pipeline	46	6	1%	3%	4%	15%	22%
Tâches							
Sciage de pièces de toiture	39	4	11%	13%	17%	25%	50%
Pose et fixation de pièces de toiture	22	3	5%	14%	16%	24%	28%
Coupe au diamant du béton ou de l'asphalte	98	7	5%	7%	15%	28%	38%
Support au briqueteur-maçon	13	1	4%	7%	15%	18%	21%
Déplacement mécanique de pierre, sol etc	17	3	3%	4%	14%	25%	33%
Non précisé	105	1	3%	6%	14%	19%	23%
Sciage de pièces de maçonnerie	74	11	5%	7%	12%	19%	23%
Cassage de pièces de maçonnerie	83	10	7%	9%	12%	14%	18%
Tâches multiples	21	7	2%	4%	12%	13%	14%
Sciage - Autres	14	1	7%	10%	12%	13%	28%
Perçage de pièces de maçonnerie	48	7	5%	7%	11%	16%	24%
Meulage de joints de briques/pierres	108	5	5%	7%	9%	13%	18%
Meulage de surfaces	63	6	5%	6%	9%	12%	14%
Nettoyage	16	2	5%	7%	8%	11%	19%
Autres tâches	43	10	4%	6%	8%	12%	21%
Démolition	49	4	2%	3%	7%	9%	13%
Forage de tunnels	11	3	1%	3%	7%	17%	19%
Décapage par projection d'abrasif	37	6	2%	3%	5%	18%	22%
Ponçage	17	2	2%	2%	5%	16%	21%
Projection de béton	17	2	1%	2%	3%	4%	4%
Malaxage des ciments et mortiers	17	5	1%	1%	3%	6%	16%
Travail sur route - Autre	12	3	2%	2%	3%	16%	18%

	n ^A	nE ^B	P10 ^C	P25 ^D	Méd ^E	P75 ^F	P90 ^G
Outil							
Autres (outils mécaniques)	35	6	3%	6%	16%	27%	50%
Fraiseuse routière	98	7	5%	7%	15%	28%	38%
Marteau piqueur	27	5	6%	12%	14%	15%	21%
Scie portative à maçonnerie	50	10	7%	11%	14%	19%	27%
Non précisé	263	12	3%	5%	13%	19%	24%
Machine à forer	14	4	10%	11%	12%	16%	17%
Scie portative	13	1	7%	10%	12%	12%	26%
Perceuse	20	3	7%	7%	12%	23%	25%
Outils multiples	16	8	2%	3%	12%	14%	17%
Scie à béton à contrôle arrière	8	4	5%	8%	12%	20%	27%
Aucun	6	2	3%	6%	11%	20%	32%
Meuleuse pour joints de briques/pierres	109	5	5%	7%	9%	13%	18%
Meuleuse de finition de surface	64	7	5%	7%	9%	12%	15%
Marteau perforateur	81	4	4%	7%	9%	12%	14%
Balai, pelle, squeegee et souffleur	16	4	5%	7%	8%	17%	20%
Banc de scie à maçonnerie	20	3	5%	6%	7%	11%	15%
Machine à décaper par projection d'abrasif	31	4	2%	3%	5%	19%	22%
Tunnelier	7	2	1%	2%	4%	7%	7%
Équipement lourd (Rétrocaveuse/excavatrice/bouteur/ tracteur avec godet/pelle mécanique)	21	7	2%	3%	4%	11%	15%
Malaxeur à mortier ou ciment	8	2	1%	1%	3%	5%	6%
Autres (outils inertes)	17	6	2%	2%	3%	4%	9%
Matériau							
Sable	20	2	3%	9%	19%	23%	34%
Asphalte	93	5	5%	6%	17%	28%	38%
Brique	7	4	5%	6%	15%	37%	61%
Carreau de toiture en ciment	50	3	10%	13%	15%	23%	28%
Divers matériaux-2 (contenant du béton)	78	6	5%	7%	12%	19%	23%
Béton	190	20	5%	8%	12%	14%	19%
Non précisé	250	2	3%	6%	9%	16%	22%
Mortier	115	6	4%	6%	9%	13%	18%
Autre	19	6	2%	5%	7%	16%	27%
Pierre	35	5	1%	2%	4%	7%	11%
Divers matériaux-1 (contenant du sable)	57	6	2%	3%	4%	13%	21%
Carreaux acoustiques	10	1	1%	2%	2%	2%	3%

	n ^A	nE ^B	P10 ^C	P25 ^D	Méd ^E	P75 ^F	P90 ^G
Maîtrise à la source							
Autre	13	3	9%	17%	26%	33%	45%
Aucun	234	28	3%	7%	12%	16%	34%
Ventilation locale	117	14	6%	8%	11%	15%	23%
Non précisé	458	8	3%	5%	9%	17%	23%
Ventilation locale + Arrosage/surface	18	2	2%	3%	9%	18%	24%
Arrosage/surface	47	8	2%	3%	8%	15%	22%
Arrosage/outil	37	8	5%	6%	8%	12%	16%

^A : Total des valeurs d’exposition individuelles

^B : Nombre de sources dont sont tirées les valeurs d’exposition

^C : 10^e centile de la distribution

^D : 25^e centile de la distribution

^E : Valeur médiane

^F : 75^e centile de la distribution

^G : 90^e centile de la distribution

ANNEXE 4. EXEMPLE DE CALCUL DE PRÉDICTION D'UNE MOYENNE GÉOMÉTRIQUE

Tel que mentionné à la section 2.2.3, il est possible de réaliser des prédictions de moyennes géométriques pour divers scénarios d'intérêt à partir des estimés pondérés présentés aux annexes 3 et 4. L'exemple suivant présente le calcul d'une prédiction de la moyenne géométrique de l'exposition à la silice cristalline sur 8 heures pour le titre d'emploi d'opérateur d'équipement lourd selon le scénario suivant :

Variable	Catégorie ou valeur numérique
Titre d'emploi	Opérateur d'équipement lourd
Durée d'échantillonnage	480 minutes
Année	2000
Secteur d'activité	Génie civil et voirie
Type de projet	Construction nouvelle
Environnement	Extérieur
Maîtrise	Non
Stratégie	Conformité et surveillance à parts égales

Le tableau ci-dessous contient les estimés pondérés (provenant de l'annexe 3) des catégories correspondantes au scénario dans la colonne A. Les valeurs – ou facteurs multiplicatifs – associées au scénario de prédiction sont quant à elles inscrites dans la colonne B. Pour chaque variable nominale, la somme des valeurs des catégories varie entre 0 et 1. Pour les catégories de référence, la valeur pour le scénario est inscrite entre parenthèses et n'entre pas dans le calcul puisque son estimation est contenue dans la constante.

Colonne	A	B	C
	β	Scénario	A x B
Constante	-2,185	1	-2,185
Durée (ln(min))	-0,261	ln(480)	-1,611
Année (-1991)	0,083	2000-1991	0,747
Titre d'emploi			
Opérateur d'équipement lourd	-0,274	1	-0,274
Secteur d'activité			
Génie civil et voirie	Référence	(1)	0
Type de projet			
Construction nouvelle	-0,593	1	-0,593
Stratégie d'échantillonnage			
Conformité réglementaire	2,684	1/2	1,342
Surveillance	Référence	(1/2)	0
Environnement			
Extérieur	Référence	(1)	0

<i>Colonne</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
	β	Scénario	A x B
Maîtrise (utilisation)			
Non	Référence	(1)	0
Interaction Durée:Stratégie			
Durée (ln(min)) : Conformité	-0,036	1/2 x ln(480)	-0,110
Interaction Année:Stratégie			
Année (-1991)/Conformité	-0,271	1/2 x (2000-1999)	-0,135

Le calcul de la prédiction s’effectue d’abord en multipliant l’estimateur pondéré par catégorie par la valeur du scénario, tel qu’illustré dans la colonne C. La somme des valeurs de la colonne C (-2,819) représente le logarithme naturel de la moyenne géométrique prédite; l’exponentielle de cette valeur représente la prédiction de la MG en mg/m^3 , soit $0,06 \text{ mg}/\text{m}^3$. Il est à noter que l’incertitude associée à la prédiction ne peut être obtenue directement à partir de cette approche.