

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-673



Exposition au béryllium des travailleurs de la transformation d'aluminium et du magnésium Évaluation des paramètres de surveillance environnementale

*Chantal Dion
Stéphanie Viau
André Dufresne
Yves Cloutier
Guy Perrault*



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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2010
ISBN : 978-2-89631-517-8 (version imprimée)
ISBN : 978-2-89631-518-5 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
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,
novembre 2010

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-673

Exposition au béryllium des travailleurs de la transformation d'aluminium et du magnésium Évaluation des paramètres de surveillance environnementale

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.

*Chantal Dion¹, Stéphanie Viau¹, André Dufresne²,
Yves Cloutier¹ et Guy Perrault³*

*Avec la collaboration de :
Annie Ouellet¹, Julie McCabe¹ et Robert Love⁴*

¹IRSST

²Université de Montréal

³Consultant

⁴Université McGill

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.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les industries et les travailleurs qui nous ont accueillis et ont participé activement à l'étude ainsi que le réseau de la santé et des services sociaux pour leur aide précieuse dans l'identification des entreprises et leur soutien pendant les interventions. Nous remercions Madame Lise Brière pour la révision du texte et Madame Lucie Madden pour sa contribution à la rédaction de ce document.

SOMMAIRE

L'évaluation de l'exposition au béryllium en fonction de différentes méthodes d'échantillonnage a été menée dans quatre établissements du secteur de la transformation des métaux : une fonderie de magnésium et trois alumineries. Lors de six campagnes d'échantillonnage, cinq types d'échantillonneurs ont été utilisés, en postes fixes (ambiants) et en postes personnels (zone respiratoire) : échantillonneur de l'Institute of Occupational Medicine (IOM) (poussières inhalables), cassettes 37 mm (poussières « totales »), cyclones en aluminium SKC (poussières respirables), impacteurs en cascade Sierra, 8 étages, et impacteur MOUDI, 12 étages. Les concentrations de béryllium ont été mesurées pour 66 échantillons de poussières inhalables, 62 échantillons de poussières totales, 56 échantillons de poussières respirables, 55 échantillons d'impacteur Sierra et 19 échantillons d'impacteur MOUDI.

Les concentrations de béryllium les plus élevées ont été retrouvées avec le IOM, pour les échantillons prélevés en zone respiratoire. Les rapports des concentrations de béryllium en postes fixes, tels que normalisés par rapport à l'échantillonneur IOM sont de 0,69 ; 0,20 ; 0,66 et 0,54 pour la cassette 37 mm, le cyclone en aluminium SKC, l'impacteur Sierra et l'impacteur MOUDI, respectivement ; et, en postes personnels, ces rapports sont de 0,45 ; 0,10 et 0,64, pour la cassette 37 mm, le cyclone et l'impacteur Sierra. Même si ces comparaisons sont basées sur un nombre limité d'échantillons, nos observations suggèrent que la méthode d'échantillonnage peut avoir un effet substantiel sur la détermination de la concentration de béryllium.

Une des alumineries étudiées a modifié sa source d'approvisionnement en alumine. Deux interventions ont été réalisées dans cette entreprise, lorsque la teneur en Be dans l'alumine a diminué de 3 à 1 µg/g. Les concentrations de Be dans l'air ont également diminué. La teneur en Be dans l'alumine serait donc un facteur déterminant de la concentration de Be observée dans l'air.

Les concentrations de béryllium dans les établissements évalués peuvent excéder la valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) de 0,15 µg/m³, avec des valeurs mesurées atteignant un maximum de 1,7 µg/m³ (postes fixes) et 17 µg/m³ (postes personnels) pour des échantillonnages avec IOM. Tel qu'attendu, les concentrations mesurées en postes personnels sont généralement supérieures aux concentrations en postes fixes, situés généralement près de la zone où les travailleurs exécutent leurs tâches.

L'échantillonnage des aérosols inhalables serait la méthode de choix recommandée pour estimer le risque d'exposition au béryllium jusqu'à ce qu'une relation dose/réponse claire soit établie pour les différents capteurs d'échantillonnage.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	vii
1. INTRODUCTION.....	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
3. OBJECTIF DES TRAVAUX.....	5
4. DESCRIPTION DES TRAVAUX.....	7
4.1 Entreprises visitées.....	7
4.1.1 Entreprise 1 (Mg-1).....	7
4.1.2 Entreprise 2 (Al-1).....	8
4.1.3 Entreprise 3 (Al-2).....	10
4.1.4 Entreprise 4 (Al-3).....	11
4.2 Matériel d'échantillonnage.....	12
4.3 Échantillonnage.....	13
4.3.1 Échantillonnage de l'air.....	13
4.3.2 Échantillons de contamination de surface.....	14
4.4 Analyse chimique.....	14
4.5 Traitement des résultats.....	15
4.5.1 Impacteurs.....	15
4.5.2 Traitement statistique.....	15
5. RÉSULTATS.....	17
6. DISCUSSION.....	23
6.1 Concentrations comparées aux valeurs de référence.....	23
6.2 Concentrations en fonction des entreprises et des postes.....	23
6.3 Concentrations en fonction des tâches et des matières premières.....	24
6.4 Teneur en béryllium dans les aérosols.....	24
6.5 Concentrations en fonction du type d'échantillonneur.....	25
6.5.1 IOM (fraction inhalable).....	25
6.5.2 Cassette 37 mm (fraction « totale »).....	25
6.5.3 Cyclone (fraction respirable).....	26
6.5.4 Impacteurs Sierra ^{MD} et MOUDI ^{MD}	26
6.6 Échantillons de contamination de surface.....	27
6.7 Limite de l'étude.....	28

7.	CONCLUSION.....	29
8.	RECOMMANDATIONS	31
9.	RÉFÉRENCES	33
	ANNEXE 1	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Description des échantillonnages et nombre d'échantillons analysés	14
Tableau 2: Pourcentage d'échantillons dépassant la valeur seuil	17
Tableau 3: Concentration médiane de poussières (étendue) (mg/m^3)	18
Tableau 4: Concentration médiane de béryllium (étendue) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	19
Tableau 5: Teneur moyenne de béryllium dans l'air ($\mu\text{g Be}/\text{g}$ poussières)*	20
Tableau 6 : Rapports de concentrations médianes normalisées par rapport à IOM.....	20
Tableau 7: Rapports des concentrations médianes des postes personnels par rapport aux postes fixes.....	21
Tableau 8 : Moyenne des MMAD ¹ et des GSD ² pour les aérosols échantillonnés avec les impacteurs Sierra ^{MD} et MOUDI ^{MD}	22
Tableau 9 : Échantillons de contamination de surface (frottis)	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Travaux de réfection d'un four.....	8
Figure 2 : Prélèvements en poste personnel.....	9
Figure 3 : Poste de réduction du bain électrolytique.....	10
Figure 4 : Nettoyage manuel d'une anode	11
Figure 5 : Capteurs d'échantillonnage (cassette 37 mm ; cyclone d'aluminium, IOM, Sierra et Moudi).....	12
Figure 6 : Échantillonnage de surface avec Ghost Wipe®	13

1. INTRODUCTION

Le béryllium est un élément métallique utilisé dans les alliages en raison de ses propriétés particulières. Il est léger, non magnétique, résistant à la corrosion, bon conducteur thermique et possède un point de fusion élevé. Le béryllium est présent dans une grande variété de matériaux utilisés dans divers secteurs d'activité. Mise à part l'incorporation du béryllium dans les alliages (Be-Cu, Be-Ni, etc.), il est aussi présent en milieu de travail sous forme d'oxyde de béryllium (BeO) et plus rarement, sous sa forme élémentaire (Be).

Lorsque présent dans l'air sous forme de poussière ou de fumée, le béryllium peut avoir des effets sur la santé. Les maladies respiratoires liées à ce métal sont reconnues depuis plusieurs années et sont largement étudiées. Entre autres, la béryllose chronique (CBD – chronic beryllium disease) est une atteinte pulmonaire essentiellement caractérisée par la présence de granulomes à l'intérieur des poumons et peut se développer après une exposition prolongée à de faibles concentrations de béryllium. La béryllose chronique est précédée d'une phase de sensibilisation (BeS, beryllium sensitization) qui est asymptomatique (*Newman, 2005*). Ce ne sont pas toutes les personnes sensibilisées au béryllium qui développeront la maladie. La béryllose aiguë (ABD – acute beryllium disease) quoique beaucoup plus rare que la CBD, a encore été observée récemment (*Cummings, 2009*). L'ABD est caractérisée par un phénomène d'irritation chimique qui peut se présenter lors d'exposition élevée, de l'ordre de 10 à plus de 100 µg/m³. Des affections de la peau, de type dermatite de contact, ont aussi été observées chez des travailleurs ayant eu une exposition cutanée au béryllium (*Rossmann, 2005, Newman, 2005, Haberman, 1993*). La prévention de la BeS et de la CBD est généralement basée sur la maîtrise de l'exposition dans la zone respiratoire du travailleur.

Au Québec, le règlement sur la santé et la sécurité du travail (*RSST, 2007*) précise, pour le béryllium et ses composés, une valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) de 0,15 µg/m³ (poussière totale). Le béryllium est classé dans la catégorie C1 (effet cancérigène démontré chez l'humain), un effet sensibilisant est noté, l'employeur doit réduire au minimum l'exposition de l'agent même si la norme est respectée (art. 42, RSST), la recirculation de poussières de béryllium est prohibée (art. 108, RSST) et l'installation de vestiaire double est requise (art. 67, RSST).

Récemment, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) a abaissé la valeur du Threshold Limit Value – Time-Weighted Average (TLV®-TWA) pour le béryllium (poussières inhalables) à 0,05 µg/m³ (ACGIH, 2009). La VEMP précédente de 2 µg/m³, en vigueur dans plusieurs pays, ne permet pas d'éviter la sensibilisation au béryllium (*Kreiss, 1996; Henneberger, 2001; Kolan, 2001; Deubner, 2001*).

Il n'y a pas de réglementation au Québec, pour la contamination de surface au béryllium. Aux États-Unis, des valeurs limites ont été proposées par le « Department of Energy » (DOE) dans son programme de prévention (*DOE, 1999*). Le Québec les a retenues comme valeurs de référence (*Dion, 2004*). Ainsi, la concentration de béryllium sur les surfaces de travail, d'équipements et d'objets ne doit pas excéder 0,2 µg/100 cm² pour que celles-ci soient considérées sans contamination au béryllium tandis qu'une valeur de 3,0 µg/100 cm² a été retenue comme étant la valeur maximale à respecter dans les zones de travail contaminées au

béryllium durant les périodes non opérationnelles. Dans ce dernier cas, des mesures de protection générales et individuelles adéquates doivent être respectées.

À ce jour, plus de 28 000 échantillons (air, frottis et poussières sédimentées) provenant de différents secteurs d'activités ont été reçus et analysés pour leur teneur en béryllium à l'IRSST. Les résultats préliminaires montrent qu'environ 18 % des échantillons d'air reçus dépassent la valeur d'exposition moyenne pondérée de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le béryllium et ses composés; 12 % des frottis ont une concentration de béryllium supérieure à $0,2 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ (seuil de présence); et 9 % des poussières sédimentées ont une teneur en béryllium supérieure à 10 ppm.

Depuis 1999, 38 cas de sensibilisation et 38 cas de béryllose chronique et subclinique diagnostiqués chez des travailleurs ont été indemnisés par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST). La plupart de ces cas proviennent des secteurs des fonderies et de l'aéronautique (*Boucher, 2008*). La CSST a identifié, à partir des secteurs à risques rapportés dans la littérature scientifique, près de 2 800 entreprises québécoises susceptibles de manipuler du Be dans le cadre de leurs activités. Elle a développé un plan d'action avec ses partenaires (Réseau de la Santé, IRSST et les associations sectorielles paritaires (ASP)) afin d'évaluer la situation dans les industries du Québec en priorisant certains secteurs d'activité (métal de premières transformations (fonderie), aéronautique, environnement et usinage de pièces contenant du béryllium). La démarche était basée sur des interventions dans ces entreprises incluant des échantillonnages de contamination de surface à l'aide de frottis pour vérifier la présence de béryllium. Pour les cas où le béryllium était présent, des échantillonnages d'air ont été effectués. Dans le secteur des fonderies, la présence de béryllium a été décelée dans 44 entreprises qui employaient 13 000 travailleurs. Environ 400 travailleurs de 18 entreprises différentes étaient exposés à des niveaux de béryllium supérieurs à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (*CSST, 2004*).

Des visites en industries pour différents secteurs d'activité étaient prévues lors de l'élaboration du projet. Or, devant les difficultés liées aux planifications et aux lieux physiques, seul le secteur des fonderies a pu être étudié lors de six interventions réalisées dans quatre usines différentes. Les principales tâches où l'exposition au béryllium était non négligeable, ont été caractérisées pour les différents départements des fonderies visitées : scellement des anodes, laboratoire d'analyse des échantillons de bain électrolytique, coulée et réfection d'un four.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

La distribution granulométrique et la nature chimique des particules de béryllium constituent des éléments significatifs de l'élaboration d'une relation entre l'exposition des travailleurs au béryllium et l'apparition de la sensibilisation ou de la béryllose chronique.

En effet, plusieurs études en hygiène du travail soulignent l'importance de la granulométrie dans l'évaluation de l'exposition au béryllium. Par exemple, Kent *et al.* (2001) ont évalué l'exposition au béryllium des travailleurs dans cinq secteurs différents à l'intérieur d'une usine de production de béryllium, en tenant compte de la concentration de particules de béryllium en masse totale par mètre cube en fonction de deux diamètres aérodynamiques : inférieur à 10 μm et inférieur à 3,5 μm (granulométries reliées à une pénétration dans les poumons). L'évaluation de l'exposition y a été réalisée à l'aide de prélèvements en poste personnel (avec l'impacteur Sierra^{MD}) et de prélèvements en poste ambiant (impacteur MOUDI^{MD}). Une relation statistiquement significative entre l'exposition aux particules de béryllium et la prévalence de la sensibilisation et de la CBD a été démontrée seulement en poste ambiant pour la fraction granulométrique inférieure à 3,5 μm . Selon cette étude, l'évaluation en poste ambiant serait un meilleur indicateur pour la CBD et la sensibilisation au béryllium, ce qui va à l'encontre des règles fondamentales en hygiène du travail qui préconisent l'évaluation en poste personnel. Une conclusion de cette étude est que la moyenne des concentrations massiques de béryllium pour les prélèvements en poste personnel est plus élevée que la moyenne des échantillons prélevés en poste fixe. Cette observation est d'ailleurs souvent rencontrée dans ce type d'étude (Purdham, 1993; Hori, 1993; Barnard, 1996; Lange, 1999; Lange 2000a; Lange, 2000b; Dufresne, 2009).

Une autre étude sur l'exposition des machinistes d'une usine de transformation primaire du béryllium a été réalisée par Martyny *et al.* (2000). Cette étude montre que les concentrations de béryllium prélevées avec un impacteur en cascade en poste personnel sont plus élevées pour les opérations d'usinage (0,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n = 7), de micro-finition (0,74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n = 15) et de polissage (0,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n = 11) que pour celles obtenues aux postes de coupe (0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n = 14) et de trempage (0,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; n = 12). De plus, l'étude révèle que 50 % des particules de béryllium ont un diamètre aérodynamique (da) inférieur à 10 μm . Ces particules ont un potentiel de pénétration jusqu'aux régions du poumon pouvant être affectées par la béryllose chronique. Les auteurs insistent sur l'importance de l'échantillonnage en poste personnel, dans la zone respiratoire, afin de qualifier adéquatement l'exposition des travailleurs lors d'études en relation avec les effets sur la santé.

Kelleher *et al.* (2001) ont réalisé une étude de cas-témoins constituée de 20 cas (CBD ou BeS) et 206 témoins travaillant dans la même usine que celle étudiée par Martyny *et al.* (2000). Les auteurs n'ont pas établi de différence statistiquement significative entre les cas et les témoins pour l'exposition cumulative de la masse totale des particules de béryllium et pour les particules de granulométrie inférieure à 6 μm et inférieure à 1 μm . Ils énoncent plusieurs facteurs pouvant expliquer leur difficulté à établir une relation dose-réponse : susceptibilité génétique des travailleurs (Maier, 2001), la présence de pics d'exposition, les pratiques d'hygiène du travail ainsi que la forme chimique de béryllium impliquée. L'étude démontre toutefois que les machinistes étaient plus exposés aux particules inférieures à 1 μm que les autres professions selon l'exposition cumulée médiane. La prévalence de CBD ou BeS dans cette usine est de

11,5 % pour les machinistes et de 2,9 % pour les travailleurs n'ayant jamais travaillé comme machiniste.

En ce qui concerne la spéciation chimique du béryllium, les études tendent à confirmer que la toxicité diminue dans ce sens : BeO > Be métal > alliage CuBe (*Paustenbach, 2001*). La solubilité des composés de béryllium aurait également un impact important. En effet, les particules de béryllium insolubles, dont l'évacuation pulmonaire est très lente, seraient plutôt associées à la béryllose chronique, tandis que la sensibilisation serait initiée par des composés plus solubles qui diffusent plus facilement vers le système sanguin.

Dans le secteur des alumineries, la source de béryllium est l'alumine. Le béryllium atteindrait, dans le bain électrolytique, une concentration de 40 à 90 fois sa concentration initiale dans l'alumine (*Lindsay, 2006*). De plus, les particules ultrafines échantillonnées dans les cuves d'alumineries contiendraient majoritairement des composés solubles de béryllium (*Thomassen, 2005*). La présence de Be dans les fonderies de magnésium n'est pas documentée dans la littérature.

Plusieurs publications soulignent que la concentration de béryllium exprimée par la masse totale, selon les méthodes conventionnelles en hygiène du travail, ne serait pas le paramètre le plus pertinent pour l'établissement de normes (*Kent, 2001; Paustenbach, 2001; US DOE, 1999*). Le béryllium est associé à une maladie pulmonaire, la béryllose chronique (BC). La BC se caractérise par l'apparition de granulomes pouvant évoluer vers la formation de fibrose interstitielle, résultant d'une réaction immunitaire spécifique au béryllium (*INSPQ, 2004*). Il semble donc normal de connaître et de mesurer les caractéristiques physiques et chimiques des particules qui auront la capacité de se déposer dans le poumon (*Martyny, 2000; Kelleher, 2001*).

Du point de vue des méthodes d'échantillonnage, l'échantillonneur de poussières inhalables, utilisé dans plusieurs milieux de travail, recueille plusieurs fois la masse de poussières obtenue par la cassette 37 mm (*de Vocht, 2006; Kriech, 2004; Tsai, 2001, 1996a, 1996b, 1995; Martin, 1998; Spear, 1997; Noto, 1996; Werner, 1996; Wilsey, 1996*). Plusieurs études portant sur la comparaison de différents échantillonneurs, ont permis d'obtenir une régression linéaire pour des concentrations mesurées sur des échantillons appariés (*Demange, 2002; Lidén, 2000; Predicala, 2003; Clinkenbeard, 2002; Davies, 1999; Vaughan, 1990*). Plus récemment, *O'Shaughnessy et al.* (2007) ont suggéré une méthode de correction permettant de prédire le rapport échantillonneur/échantillonneur en fonction de la distribution de la taille des particules. Cette méthode rapporte un biais à partir des courbes d'efficacité de prélèvement des échantillonneurs et de la distribution de taille des particules présentes dans les milieux de travail.

Les échantillonnages réalisés côte à côte dans la présente étude permettent de comparer les différents échantillonneurs, dans un contexte semblable au modèle théorique de Soderholm (1993).

3. OBJECTIF DES TRAVAUX

L'objectif principal de cette recherche était de vérifier si les différents indicateurs d'exposition au Be affectent la classification des travailleurs par gammes de concentration. Dans une première phase, l'hypothèse de la recherche consistait à démontrer que les concentrations de poussières inhalables (diamètre aérodynamique, $D_a = 0 - 100 \mu\text{m}$), respirables (D_a médian = $4 \mu\text{m}$) ou sous-microniques ($D_a < 1 \mu\text{m}$), répartissent les travailleurs dans des classes différentes d'exposition selon la nature du procédé, selon la profession, selon la nature du matériau et selon le taux d'exposition.

Un objectif secondaire était de caractériser les aérosols aux sources d'émission, en déterminant leur composition chimique et leur distribution granulométrique, afin de favoriser la mise en place de moyens de maîtrise.

Les facteurs pouvant contribuer à des variations des taux d'exposition des travailleurs devaient être documentés : les méthodes et habitudes de travail, les équipements de protection, la ventilation et l'aspiration à la source ainsi que la possibilité d'absorption des contaminants par la voie cutanée.

4. DESCRIPTION DES TRAVAUX

Les concentrations de poussières et de béryllium ont été déterminées en zone respiratoire des travailleurs selon les techniques d'échantillonnage et d'analyse décrites dans le Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air de l'IRSST (IRSST, 2005). Tous les prélèvements ont été effectués à l'extérieur des équipements de protection individuelle (EPI) portés par les travailleurs. Des prélèvements similaires en poste fixe ont également été effectués afin de mieux caractériser les poussières aéroportées susceptibles de contenir du Be.

4.1 Entreprises visitées

Dans le cadre de ce projet, six interventions ont été réalisées dans quatre entreprises du secteur des fonderies : une usine de production de magnésium (Mg) et trois alumineries (Al).

4.1.1 Entreprise 1 (Mg-1)

Deux interventions ont été réalisées dans cette fonderie de magnésium (Mg) produisant des lingots de magnésium pur et des lingots en alliages de magnésium. Le béryllium (Be) est ajouté dans ces alliages afin de limiter la perte au feu, en accroître la rigidité et la légèreté ou en limiter les problèmes de corrosion (Wagner, 2003). Le produit fini sous forme de lingot d'alliage peut contenir entre 6 à 15 ppm ($\mu\text{g/g}$) de Be. Un recyclage réalisé à l'interne produit des lingots contenant entre 6 et 7 ppm de Be. L'usine recycle également les débris de Mg produits par ses clients.

La première intervention (Mg-1-1) s'est déroulée sur deux jours et deux nuits, à plusieurs postes de travail de la fonderie. Quatre équipes de travailleurs ont été investiguées. Chaque équipe contribue à une production en continue et était relevée après une période de 12 heures répartie selon une séquence de 3 jours de travail / 2 jours de congé/ 3 jours de travail. Chaque équipe est composée de cinq travailleurs affectés à différentes tâches (nettoyage des fours, coulée, transport du matériel et coupe de lingots). Une autre équipe de trois opérateurs est nécessaire à l'opération de « grabage » qui consiste à enlever le métal non fondu et les autres résidus dans le four avec un camion muni d'une benne preneuse. Ces derniers travaillent généralement sur un horaire d'environ 8 heures, seulement le jour, 5 jours par semaine. Les journées d'échantillonnage ont été planifiées afin d'obtenir tous les types d'échantillonnage requis, en poste fixe ainsi qu'en poste personnel, pour un total de 64 prélèvements.

Les EPI utilisés par ces travailleurs variaient selon le type de tâches que l'opérateur avait à effectuer. L'équipement de base comprenait des vêtements de travail (nettoyés par la compagnie), un casque avec visière (nécessaire lors de la coulée du métal dans un four), des bouchons et/ou des coquilles pour la protection auditive, des gants en tissu pour la manutention et des bottes de sécurité. Selon les tâches à accomplir, le port de vêtements de travail et de gants pour manutention de métal ainsi qu'un appareil de protection respiratoire (APR) demi-masque ou à épuration d'air motorisé, avec masque souple/visière-écran et protection pour la tête, pouvaient être ajoutés aux équipements de protection de base.

La deuxième intervention (Mg-1-2) dans cette même usine s'est déroulée pendant les activités de réfection de deux fours, réalisées par une firme externe, en sous-traitance. Deux équipes de trois

travailleurs se relayaient à toutes les 12 heures, de jour et de nuit. Généralement, deux travailleurs effectuaient l'enlèvement du métal solidifié sur les parois internes du four à l'aide d'un marteau-piqueur. Le troisième travailleur, à l'extérieur du four, ramassait les débris pour les disposer dans des barils. Lors de la deuxième journée, une chargeuse-pelleteuse a été utilisée pour finaliser le grattage des parois du four et la collecte des débris. La réfection des fours est reconnue par l'entreprise pour être l'opération générant le plus de poussières de béryllium dans l'air. L'échantillonnage s'est déroulé durant deux jours et une nuit afin de rencontrer les exigences méthodologiques du projet; pour un total de 49 prélèvements.



Figure 1 : Travaux de réfection d'un four

Les EPI comprenaient un survêtement de vinyle, des lunettes de sécurité, des bouchons et/ou des coquilles, des gants pour métal ignifugés, des bottes avec protecteur métatarsien ainsi qu'un appareil de protection respiratoire (APR).

4.1.2 Entreprise 2 (AI-1)

La deuxième entreprise visitée est une aluminerie opérant selon un procédé de réduction électrolytique qui s'effectue à l'intérieur d'une cuve. Une anode faite de coke de pétrole et de brai de goudron, placée au-dessus de la cuve, est traversée par un courant électrique vers la cuve (cathode) permettant la réduction de l'alumine. Dans ce procédé, l'anode se consume et doit être remplacée à une fréquence d'environ vingt-deux jours.

L'usine comprend un secteur pour la récupération des blocs d'anodes usées (ou mégots) et le recyclage du bain électrolytique résiduel collé sur l'anode durant le procédé. La tâche ciblée pour les deux interventions était le poste de nettoyage manuel des mégots situé dans le département du scellement des anodes. Les mégots y sont transportés à l'aide d'un convoyeur aérien qui les achemine vers les différentes stations de nettoyage. Le mégot circule à travers trois postes de

nettoyage automatisés afin d'éliminer la majorité du bain résiduel pour ensuite être traité au poste de nettoyage manuel. Le travailleur affecté à ce poste utilise divers outils, manuels et pneumatiques, pour compléter le nettoyage du mégot. La tâche est effectuée de jour sur une période de 12 heures. Deux travailleurs alternent dans la journée, pour une période de 6 heures chacun, et ne seront affectés à cette tâche qu'après neuf jours.

Deux interventions ont été effectuées dans ce département, au poste de nettoyage manuel, à 18 mois d'intervalle, avant et après le changement de la source d'approvisionnement en alumine. La teneur en Be de l'alumine a passé d'environ 3 ppm, lors de la première intervention (Al-1-1), à moins de 1 ppm, à la deuxième intervention (Al-1-2). Un suivi mensuel effectué par l'entreprise a permis d'observer une diminution de la teneur en Be du bain liquide et du bain de recouvrement des cuves.

L'échantillonnage s'est étalé sur trois jours, pour un total de 51 prélèvements pour la première intervention et de 48 prélèvements pour la deuxième intervention.

Certains travailleurs ne portaient ni gants ni appareil de protection respiratoire (APR). Toutefois, la majorité des travailleurs utilisaient des gants en cuir ainsi qu'un APR, soit un masque jetable ou un masque complet avec filtres à particules.

Environ 275 anodes usées ont été traitées durant la première intervention et 300 durant la deuxième, le nombre moyen durant une journée normale étant d'environ 350.



Figure 2 : Prélèvements en poste personnel

4.1.3 Entreprise 3 (Al-2)

La troisième entreprise investiguée est aussi une aluminerie. Le bain électrolytique, résultant de l'électrolyse de l'alumine, contient principalement de la cryolite (Na_3AlF_6), du fluorure d'aluminium (AlF_3) et du fluorure de calcium (CaF_2). L'entreprise contrôle la qualité de l'électrolyte à l'aide d'analyse par diffraction des rayons X (DRX) dans ses propres laboratoires. Selon des analyses effectuées par l'entreprise, la teneur en béryllium de l'alumine se situe généralement entre 1,5 et 2 ppm en concentration massique. Lors de la transformation de l'alumine en aluminium, la concentration en béryllium peut atteindre 100 ppm (écart-type de 8 ppm) dans la cuve d'électrolyse.

L'intervention ciblait la tâche du « broyage de bain » et la préparation d'échantillons pour l'analyse par la diffractométrie des rayons-X. La tâche consiste à pulvériser les échantillons de bain et à compacter la poudre résultante (bain broyé) pour en former des plaquettes. Deux techniciens de laboratoire se partagent la tâche à tour de rôle durant la journée, pour un objectif quotidien de 256 échantillons. Chaque technicien travaille à ce poste environ 3 heures par jour, 4 à 5 jours par semaine, selon sa disponibilité.



Figure 3 : Poste de réduction du bain électrolytique

Lors de ces opérations, le technicien réduit le bain électrolytique en poudre à l'aide d'un broyeur dans lequel il insère et retire l'échantillon manuellement. L'échantillon broyé est ensuite placé dans un porte-échantillons à l'aide d'un entonnoir. Un jet d'air est utilisé à l'extérieur de la hotte afin de nettoyer l'entonnoir et récupérer le reste de l'échantillon. Le technicien se déplace ensuite vers une table de travail où il compacte la poudre à l'aide d'une spatule afin d'en faire des plaquettes. Le tout s'effectue dans une salle en pression négative dont l'entrée est précédée de deux sas. Les techniciens portent des combinaisons protectrices jetables en Tyvek^{MD} avec couvre-tête et couvre-bottes, des bouchons et des coquilles protectrices, des gants synthétiques,

des lunettes de sécurité, et un équipement de protection respiratoire, un masque complet avec filtres à particules. Les prélèvements ont été effectués à l'extérieur des équipements de protection individuelle portés par les travailleurs.

L'échantillonnage s'est étalé sur trois jours et les prélèvements ont été réalisés en poste personnel (zone respiratoire) pour déterminer le niveau d'exposition des travailleurs, et en poste fixe afin de caractériser la poussière générée par le procédé. Les journées d'échantillonnage ont été planifiées afin d'obtenir tous les types d'échantillonnage requis, en poste fixe ainsi qu'en poste personnel, pour un total de 40 prélèvements.

4.1.4 Entreprise 4 (AI-3)

L'intervention réalisée à l'entreprise 4, une autre aluminerie, s'est déroulée au poste de nettoyage des anodes usées, tout comme dans l'entreprise 2. La tâche est également effectuée de jour et de nuit sur une période de 12 heures par deux travailleurs s'activant en parallèle sur des plateformes différentes. L'échantillonnage en poste fixe s'est déroulé uniquement sur l'une des deux plateformes. Cependant, les deux travailleurs ont collaboré à l'échantillonnage en poste personnel. Le contenu en béryllium dans l'alumine n'était pas connu.

L'échantillonnage s'est déroulé durant deux jours couvrant quatre quarts de travail (soir, nuit, matinée et après-midi). Les journées d'échantillonnage ont été planifiées afin d'obtenir tous les types d'échantillonnage requis, en poste fixe ainsi qu'en poste personnel, pour un total de 40 prélèvements.



Figure 4 : Nettoyage manuel d'une anode

Les travailleurs portaient des gants en cuir ainsi qu'un appareil de protection respiratoire (APR) de type appareil à épuration d'air motorisée avec un masque complet.

4.2 Matériel d'échantillonnage

L'utilisation de différents capteurs pour l'échantillonnage, en poste personnel et en poste fixe, a permis l'analyse de la distribution granulométrique des poussières et du béryllium dans l'air des milieux de travail.

- La fraction de poussières « totales » a été prélevée à l'aide d'une cassette fermée, de 37 mm de diamètre avec une ouverture de 4 mm, munie d'une membrane en esters de cellulose mélangés (ECM) de porosité de $0,8 \mu\text{m}$ (SKC FLT225-5), opérée à un débit de la pompe de 2 L/min.
- La fraction inhalable des particules a été prélevée à l'aide du capteur IOM^{MD} (Institute of Occupational Medicine) muni d'une membrane ECM de 25 mm et de porosité de $0,8 \mu\text{m}$ (SKC PCR 225-79A), dont le débit a été ajusté à 2 L/min.
- Pour l'échantillonnage de la fraction respirable, une cassette ouverte en 3 pièces de 37 mm équipée d'une membrane ECM de porosité de $0,8 \mu\text{m}$ (SKC FLT225-5), combinée à un cyclone d'aluminium (SKC PCXR225-01-02) (diamètre de coupure à 50 % : $4 \mu\text{m}$), a été utilisée à un débit de pompe de 2,5 L/min.
- Un impacteur en cascade Sierra^{MD} de 8 étages (Andersen^{MD} modèle 298, Anderson Samplers Inc.) avec des substrats de 34 mm en ECM ou en film de polyester de type Mylar^{MD}, à un débit de 2 L/min a été utilisé pour le prélèvement d'aérosols dans une fourchette de granulométrie variant de $0,52 \mu\text{m}$ à $21,3 \mu\text{m}$ (poussières inhalables et respirables). À noter que le viseur n'a pas été installé sur les impacteurs lors de l'intervention, augmentant ainsi l'ouverture pour l'échantillonnage (ceci a été pris en compte lors de la correction des résultats).

En poste fixe, s'est ajouté un impacteur en cascade à 10 étages MOUDI^{MD} (Micro Orifice Uniform Deposit Impactor) (MSP Corporation, Model 110 MSP), muni de substrats en ECM ou en aluminium 37 mm à un débit de 30 L/min., permettant le prélèvement d'aérosols dans une fourchette de granulométrie variant de $0,056 \mu\text{m}$ à $18 \mu\text{m}$.



Figure 5 : Capteurs d'échantillonnage (cassette 37 mm ; cyclone d'aluminium, IOM, Sierra et Moudi)

Les échantillons de surface peuvent être utilisés pour répondre à divers objectifs, tel que déceler la présence de béryllium et les sources de contamination en béryllium ou pour vérifier l'efficacité des activités de nettoyage (Dion, 2004). Pour l'échantillonnage de surface (poussières déposées),

une trousse développée pour le prélèvement de frottis a été utilisée (figure 6). Chaque trousse comprend des chiffons humides 15 cm x 15 cm (Ghost Wipe^{MD}, Environmental Express^{MD}), des gabarits de 100 cm² et des contenants numérotés pour le transport des chiffons usés. Une procédure écrite explique comment prélever les poussières sur la surface étudiée (IRSST, 2008).



Figure 6 : Échantillonnage de surface avec Ghost Wipe®

4.3 Échantillonnage

4.3.1 Échantillonnage de l'air

Les capteurs d'échantillonnage ont été utilisés sur les travailleurs, en zone respiratoire, et ont été fixés sur un tripode, dans un périmètre d'environ 20 cm, à une hauteur autour de 1,5 mètres, pour les postes fixes. Pour la majorité des interventions, les travailleurs ont accepté de porter deux capteurs d'échantillonnage en parallèle. Les échantillons en zones respiratoires et en postes fixes étaient prélevés à proximité du même poste, pendant la même période de temps, dans la mesure du possible. Les débits d'échantillonnage étaient ajustés et vérifiés avant, pendant et à la fin des interventions. Ni graisse, ni silicone n'a été appliqué sur les membranes en ECM insérées dans les impacteurs Sierra et MOUDI, en raison des interférences potentielles pour l'analyse du béryllium.

Le sommaire des types d'échantillonnage et du nombre d'échantillons prélevés en poste fixe et en poste personnel pour les différentes entreprises est présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Description des échantillonnages et nombre d'échantillons analysés

Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37-mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD(a)}	Impacteur MOUDI ^{MD(a)}
Nombre d'échantillons en poste fixe					
Mg-1-1	[7] (5)	[5] (4)	[9] (5)	[7] (6)	[4] (3)
Mg-1-2	[4] (3)	[4] (3)	[4] (3)	[4] (3)	[4] (3)
Al-1-1	[10] (10)	[14] (14)	[6] (6)	[3] (2)	[3] (2)
Al-1-2	[7] (7)	[5] (5)	[5] (5)	[8] (7)	[7] (6)
Al-2	[4] (5)	[4] (5)	[2] (5)	[5] (4)	[3] (2)
Al-3	[4] (4)	[3] (4)	[4] (4)	[8] (7)	[4] (3)
Total	[36] (34)	[35] (35)	[30] (28)	[35] (29)	[25] (19)
Nombre d'échantillons en zone respiratoire					
Mg-1-1	[9] (9)	[7] (7)	[8] (8)	[8] (8)	-
Mg-1-2	[9] (9)	[8] (8)	[6] (6)	[6] (6)	-
Al-1-1	[3] (3)	[2] (2)	[3] (3)	[3] (2)	-
Al-1-2	[4] (4)	[3] (3)	[4] (4)	[5] (5)	-
Al-2	[3] (3)	[2] (3)	[2] (3)	[3] (1)	-
Al-3	[4] (4)	[4] (4)	[4] (4)	[4] (4)	-
Total	[32] (32)	[26] (27)	[27] (28)	[29] (26)	-
Total des échantillons en poste fixe et en zone respiratoire					
	[68] (66)	[61] (62)	[57] (56)	[64] (55)	[25] (19)

[] = échantillons de poussières;

() = échantillons de poussières pour lesquels le béryllium a été analysé;

(a) tous les étages ont été analysés et les masses ont été regroupées.

4.3.2 Échantillons de contamination de surface

Des échantillons de surface ont été réalisés dans les locaux, dans les zones où des échantillons d'air ont aussi été prélevés ainsi que sur la peau (visage et cou) de certains travailleurs (Day, 2006). Les prélèvements de surface ont été réalisés à l'aide de lingettes humides (Ghost Wipe^{MD}) et d'un gabarit de 100 cm² (IRSST, 2008) tandis que pour la peau, aucun gabarit n'a été utilisé.

4.4 Analyse chimique

La plupart des échantillons prélevés selon les différentes techniques d'échantillonnage retenues (IRSST, 2005) ont d'abord été analysés par la méthode gravimétrique (IRSST 48) afin de déterminer la concentration de poussières. La valeur minimale rapportée (VMR) est de 25 µg.

L'analyse du béryllium a ensuite été réalisée sur ces mêmes échantillons à l'aide de la technique du plasma à induction avec couplage à un spectromètre de masse, ICP-MS (méthode IRSST 359). La valeur minimale rapportée (VMR) de béryllium sur les filtres est de 0,0005 µg et de 0,05 µg pour les Ghost Wipes^{MD}.

4.5 Traitement des résultats

4.5.1 Impacteurs

Les impacteurs permettent d'évaluer la distribution de la masse totale de particules dans l'air en fonction de différentes tranches granulométriques. Ils permettent d'estimer le diamètre aérodynamique médian de la distribution des masses (MMAD), en supposant une population log-normale. Par exemple, un MMAD de 3,2 µm indique que 50 % de la masse totale de particules prélevées a un diamètre aérodynamique (d_a) inférieur à 3,2 µm. On détermine cette valeur à l'aide du graphique du cumulatif de la masse par niveau granulométrique. Lorsque la population suit une distribution log-normale, l'écart type géométrique (GSD, geometric standard deviation) peut être calculé à partir de la pente de la droite du graphique log-probabilité. Plus la pente est faible, plus le GSD est élevé et plus la distribution granulométrique dans l'air prélevé est étendue (Lodge, 1986).

Pour les calculs des diamètres aérodynamiques médians en masse (MMAD) et des déviations standards géométriques (GSD), les données ont été corrigées, pour chaque étage des impacteurs Sierra, pour les pertes totales, à l'entrée, sur les parois et sur le haut du premier étage, en utilisant les courbes publiées (Rubow, 1987). Aucune correction n'a été faite sur les données obtenues par l'impacteur MOUDI. Les MMAD pour les deux impacteurs ont été calculés à partir des graphiques log-probabilité, les données y étant distribuées approximativement autour d'une droite. Une importance moindre a été donnée aux points inférieurs à 10% et supérieurs à 90% (Lodge, 1986). Tous les calculs ont été réalisés sur le logiciel Microsoft® Excel Office 2003.

4.5.2 Traitement statistique

En raison d'un nombre limité d'échantillons (en général, moins de 6 par train d'échantillonnage), les concentrations médianes et l'étendue des concentrations ont été utilisées pour estimer la tendance centrale et la variance des différentes séries d'échantillonnage, à l'aide du logiciel Minitab version 15 (Minitab, State College PA). Des moyennes de MMAD et de GSD ont été déterminées à partir de données des impacteurs. Les résultats inférieurs à la valeur minimale rapportée de la méthode ont été inclus dans les calculs statistiques, la règle suivante a été appliquée pour déterminer la concentration : $(VMR_{\text{masse}} / \text{volume}) / 2$ (Hornung, 1990).

Une analyse des moyennes (ANOM), une forme graphique analogue de l'analyse des variances (ANOVA), a également été utilisée avec le logiciel Minitab (Minitab, version 14) pour tester l'égalité des populations d'échantillons de béryllium.

5. RÉSULTATS

Les résultats de la présente étude ont déjà fait l'objet d'une publication récente (*Dufresne, 2009*). Les résultats des analyses de poussières et de béryllium pour chacune des entreprises sont présentés sous forme de tableaux comparatifs pour chaque type d'échantillonnage à l'annexe 1 (tableaux A-1 à A-12). Ces tableaux présentent les valeurs statistiques calculées à partir des données de concentration de poussières (mg/m³) et de concentration de béryllium (µg/m³) pour les poussières totales, inhalables et respirables en milieu ambiant et en poste personnel ainsi que les résultats des impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD}. Pour chaque groupe homogène d'exposition (dans chaque fraction d'aérosol échantillonnée en zone respiratoire et en poste fixe), l'analyse statistique descriptive comprend la moyenne arithmétique, l'écart type, la moyenne géométrique, l'écart type géométrique (GSD), la médiane, le 95^e centile de la courbe log-normale ainsi que le pourcentage d'échantillons excédant une valeur de référence, TWA ou VEMP (% > valeur seuil). Les résultats représentent les concentrations obtenues pour la durée réelle d'échantillonnage et ne sont pas tous applicables à une valeur d'exposition réglementaire sur huit heures de travail. Toutefois, s'il s'agissait de valeurs ajustées sur 8 heures, les fractions de dépassement de la valeur seuil des poussières inhalables (I), totales (T) et respirables (R) seraient telles que présentées au tableau 2.

Tableau 2: Pourcentage d'échantillons dépassant la valeur seuil

Entreprises	Poussières % > valeur seuil ¹						Béryllium % > 0,15 µg/m ³					
	Fixe			Personnel			Fixe			Personnel		
	T	I	R	T	I	R	T	I	R	T	I	R
Mg-1-1					11					14	11	
Mg-1-2				43	78	33				63	78	33
Al-1-1	14	10			33		79	100	33	50	100	33
Al-1-2		14					60	100		33	75	
Al-2					100					100	100	
Al-3								50			25	

¹ : Valeur-seuil : poussières totales et inhalables : 10 mg/m³; poussières respirables : 3 mg/m³;
T = Totale; I = Inhalable; R = Respirable.

Des dépassements des valeurs limites d'exposition pour les concentrations de poussières et de béryllium sont observés plus fréquemment en poste personnel qu'en poste fixe. Les taux de dépassement les plus fréquents sont observés pour le béryllium dans toutes les entreprises en échantillonnage de poussières inhalables, en poste personnel.

Il faut toutefois interpréter ces résultats avec précaution, car les courbes log-normales sont élaborées à partir d'un faible nombre d'échantillons (en général, moins de 6 par train d'échantillonnage). C'est pourquoi les concentrations médianes ont été utilisées pour estimer la tendance centrale et la variance des différentes séries d'échantillonnage, tel que mentionné à la section 4.5.2

Le tableau 3 présente les concentrations médianes de poussières et leur étendue pour tous les types d'échantillonnage utilisés lors des six interventions, en poste fixe et en zone respiratoire des travailleurs (poste personnel). Pour l'ensemble des résultats, les observations sur les taux de

dépassement du tableau 2 sont corroborées par les valeurs de la médiane ou l'étendue des concentrations retrouvées (valeurs en gras). Les masses totales des poussières pour les huit étages de l'impacteur Sierra et les douze étages de l'impacteur MOUDI sont également fournies dans ce tableau.

Tableau 3: Concentration médiane de poussières (étendue) (mg/m³)

Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37- mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD}	Impacteur MOUDI ^{MD}
Poste fixe					
Mg-1-1	0,78 (0,28 ; 1,4)	0,64 (0,32 ; 1,5)	0,32 (0,27 ; 0,84)	0,70 (0,37 ; 9,6)	0,83 (0,14 ; 1,1)
Mg-1-2	2,4 (0,65 ; 3,3)	1,3 (0,34 ; 2,0)	0,31 (0,09 ; 0,38)	1,7 (0,51 ; 2,0)	1,5 (0,39 ; 2,3)
Al-1-1	6,1 (2,4 ; 16)	4,2 (1,1 ; 21)	1,0 (0,37 ; 2,1)	1,6 (1,3 ; 6,40)	4,4 (1,4 ; 6,0)
Al-1-2	6,0 (3,9 ; 18)	4,0 (2,6 ; 4,9)	0,71 (0,65 ; 1,1)	3,6 (2,0 ; 8,1)	1,3 (0,80 ; 4,3)
Al-2	1,0 (0,31 ; 1,3)	0,24 ¹ (0,10 ; 0,30)	0,05 ¹ (0,02 ; 0,08) ¹	0,97 (0,05 ; 1,3) ¹	0,30 (0,20 ; 0,45)
Al-3	3,1 (0,92 ; 4,6)	1,7 (1,6 ; 1,8)	0,32 (0,17 ; 0,39)	2,5 (1,4 ; 2,9)	1,2 (0,45 ; 1,6)
Poste personnel					
Mg-1-1	2,2 (0,82 ; 10)	0,73 (0,49 ; 4,6)	0,27 (0,15 ; 0,65)	2,3 (0,54 ; 32)	-
Mg-1-2	34 (6,0 ; 197)	7,1 ¹ (0,07 ; 47)	1,7 (0,56 ; 19)	11 (5,1 ; 317)	-
Al-1-1	9,8 (3,00 ; 11)	5,3 (1,3 ; 9,2)	0,68 (0,53 ; 2,6)	5,7 (0,94 ; 8,3)	-
Al-1-2	4,0 (3,2 ; 5,9)	2,3 (1,6 ; 3,0)	0,41 (0,27 ; 0,53)	2,2 (1,70 ; 3,8)	-
Al-2	23 (14 ; 65)	5,1 (2,9 ; 7,3)	1,2 (0,97 ; 1,5)	11 (3,3 ; 14)	-
Al-3	4,7 (3,3 ; 5,4)	1,8 (1,5 ; 2,5)	0,25 (0,22 ; 0,42)	2,8 ¹ (0,87 ; 5,4)	-

¹: échantillons < VMR (25 µg); la concentration a été calculée selon : VMR / volume) / 2

Nombre d'échantillons sous la VMR: Mg-1-1 = aucun; Mg-1-2 = 1; Al-1-1, Al-1-2 = aucun, Al-2 = 3 (+ 1 Sierra dont la majorité des étages < VMR); Al-3 = quelques étages de Sierra.

Le tableau 4 résume les concentrations médianes de Be ainsi que leur étendue pour les différents capteurs utilisés pour l'échantillonnage, en poste ambiant et en poste personnel. Pour l'ensemble des résultats, les observations sur les taux de dépassement de la VEMP pour le béryllium (0,15 µg/m³) du tableau 2 sont corroborées par les valeurs de la médiane ou l'étendue des concentrations retrouvées (valeurs en gras). Les résultats cumulés de tous les étages des impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD} sont présentés dans ce tableau.

Tableau 4: Concentration médiane de béryllium (étendue) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37-mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD}	Impacteur MOUDI ^{MD}
Poste fixe					
Mg-1-1	0,001 (0,0008; 0,007)	0,0009 (0,0006; 0,002)	0,0004 (0,0004; 0,0005)	0,0002 (0,0002; 0,0006)	0,0005 (0,0004; 0,0009)
Mg-1-2	0,03 (0,006; 0,05)	0,02 (0,005; 0,04)	0,0003 ¹ (0,0002; 0,001)	0,05 (0,02; 0,32)	0,02 (0,006; 0,06)
Al-1-1	0,55 (0,18; 1,7)	0,36 (0,09; 2,0)	0,12 (0,04; 0,29)	0,13 (0,13; 0,13)	0,35 (0,13; 0,57)
Al-1-2	0,28 (0,17; 0,96)	0,23 (0,13; 0,24)	0,05 (0,04; 0,07)	0,15 (0,10; 0,23)	0,058 (0,033; 0,14)
Al-2	0,07 (0,04; 0,08)	0,05 (0,02; 0,07)	0,02 (0,01; 0,04)	0,05 (0,03; 0,07)	0,04 (0,01; 0,08)
Al-3	0,13 (0,01; 0,20)	0,06 (0,03; 0,07)	0,01 (0,01; 0,02)	0,11 ¹ (0,06; 0,16)	0,05 (0,02; 0,08)
Poste personnel					
Mg-1-1	0,02 (0,0007; 0,18)	0,007 (0,0007; 0,44)	0,0008 ¹ (0,0004; 0,0012) ¹	0,018 (0,003; 0,65)	-
Mg-1-2	0,84 (0,03; 6,7)	0,42 ¹ (0,001; 1,7)	0,08 (0,006; 1,0)	0,35 (0,05; 7,4)	-
Al-1-1	0,77 (0,19; 2,1)	0,45 (0,12; 0,78)	0,08 (0,08; 0,31)	0,18 (0,11; 0,25)	-
Al-1-2	0,19 (0,11; 0,22)	0,09 (0,07; 0,19)	0,03 (0,02; 0,04)	0,10 (0,08; 0,19)	-
Al-2	1,1 (1,0; 17)	0,45 (0,24; 0,65)	0,13 (0,09; 0,15)	0,91 -	-
Al-3	0,15 (0,08; 0,18)	0,06 (0,04; 0,10)	0,01 (0,01; 0,02)	0,11 ¹ (0,03; 0,23)	-

¹: échantillons < VMR (0,0005 μg) pour le béryllium; la concentration a été calculée selon : VMR / volume) / 2
Nombre d'échantillons < VMR: Mg-1-1 = 2; Mg-1-2 = 3; Al-1-1, Al-1-2, Al-2; = aucun; Al-3 = quelques étages de Sierra.

Le tableau 5 présente la teneur moyenne en béryllium ($\mu\text{g}/\text{g}$) pour les échantillons prélevés en poste ambiant et en poste personnel. La concentration moyenne de Be est inférieure à 180 $\mu\text{g}/\text{g}$ (0,018 %) pour tous les échantillons d'air prélevés en poussières inhalables, totales et respirables. Notons que la teneur en Be dans l'aluminerie Al-1 a diminué de moitié, lors du changement de la source d'alumine, dont la teneur en béryllium est passée de 3 $\mu\text{g}/\text{g}$ (Al-1-1) à 1 $\mu\text{g}/\text{g}$ (Al-1-2). De plus, dans l'entreprise Mg-1, la teneur en Be était plus élevée lors de la deuxième intervention (Mg-1-2), lorsque des travaux de réfection des fours étaient en cours, générant ainsi plus de poussières.

Tableau 5: Teneur moyenne de béryllium dans l'air ($\mu\text{g Be/g}$ poussières)*

Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37- mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD}	Impacteur MOUDI ^{MD}	Moyenne
Poste fixe						
Mg-1-1	3	1	1	1	1	1
Mg-1-2	14	19	4	14	23	15
Al-1-1	84	86	125	120	93	102
Al-1-2	52	50	64	47	50	53
Al-2	110	127	177	206	146	153
Al-3	34	39	42	45	33	39
Poste personnel						
Mg-1-1	32	55	3	130		55
Mg-1-2	24	54	35	25		35
Al-1-1	114	90	130	112		119
Al-1-2	41	49	66	46		51
Al-2	49	86	96	67		80
Al-3	27	33	47	42		37

* : 1 $\mu\text{g/g}$ = 1 ppm = 0,0001 %

Les concentrations médianes de poussières et de béryllium pour les différents types d'échantillonnage ont été normalisées par rapport à IOM, tel que montré au tableau 6. Chacune des concentrations pour les différents types d'échantillonnage a été divisée par la concentration équivalente obtenue avec la technique d'échantillonnage IOM. Une sous-estimation des concentrations de poussières et de béryllium est généralement observée pour tous les types d'échantillons : la médiane des rapports de concentrations médianes en poste fixe varie de 0,13 à 0,76 pour les poussières et de 0,20 à 0,69 pour le béryllium tandis que pour les postes personnels, ces valeurs varient de 0,06 à 0,57 pour les poussières et de 0,10 à 0,64 pour le béryllium. Trois rapports de concentrations médianes comparant les impacteurs à IOM sont supérieurs à l'unité (en gras dans le tableau).

Tableau 6 : Rapports de concentrations médianes normalisées par rapport à IOM

Poste fixe (poussières/Be)					
Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37- mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD}	Impacteur MOUDI ^{MD}
Mg-1-1	1/1	0,82/0,82	0,41/0,37	0,90/0,18	1,1 /0,45
Mg-1-2	1/1	0,52/0,67	0,13/0,01	0,71/ 1,7	0,63/0,73
Al-1-1	1/1	0,69/0,64	0,17/0,22	0,26/0,24	0,72/0,64
Al-1-2	1/1	0,67/0,82	0,12/0,17	0,60/0,54	0,22/0,21
Al-2	1/1	0,24/0,70	0,05/0,34	0,97/0,78	0,30/0,63
Al-3	1/1	0,55/0,46	0,10/0,10	0,81/0,85	0,39/0,35
Médiane	1/1	0,61/0,69	0,13/0,20	0,76/0,66	0,51/0,54
Poste personnel (poussières/Be)					
Mg-1-1	1/1	0,33/0,35	0,12/0,04	1,1 /0,90	-
Mg-1-2	1/1	0,21/0,49	0,05/0,09	0,32/0,42	-
Al-1-1	1/1	0,54/0,58	0,07/0,10	0,58/0,23	-
Al-1-2	1/1	0,57/0,48	0,10/0,14	0,55/0,54	-
Al-2	1/1	0,22/0,41	0,05/0,12	0,48/0,83	-
Al-3	1/1	0,38/0,40	0,05/0,07	0,60/0,73	-
Médiane	1/1	0,36/0,45	0,06/0,10	0,57/0,64	-

Le tableau 7 montre le rapport de concentrations médianes des postes personnels par rapport aux postes fixes. Les concentrations en poste personnel sont inférieures à celles en poste fixe dans l'entreprise Al-1-2, pour les différents types d'échantillonnage. De plus, les échantillons prélevés avec le cyclone démontrent également une tendance à des résultats supérieurs en poste fixe, surtout pour les poussières.

Tableau 7: Rapports des concentrations médianes des postes personnels par rapport aux postes fixes

Entreprises	IOM ^{MD} (Inhalable)	Cassette 37-mm (Total)	Cyclone (Respirable)	Impacteur Sierra ^{MD}
Poussières				
Mg-1-1	2,8	1,1	0,84	3,3
Mg-1-2	14	5,5	5,5	6,4
Al-1-1	1,6	1,3*	0,68	3,6
Al-1-2	0,67	0,58	0,58	0,61
Al-2	23	21	24*	11
Al-3	1,5	1,1	0,78	1,1
Béryllium				
Mg-1-1	20	7,8	2,0 ¹	90
Mg-1-2	28	21	267 ¹	7
Al-1-1	1,4	1,3	0,67	1,4*
Al-1-2	0,68	0,39	0,60	0,67
Al-2	16	9,0	6,5	18*
Al-3	1,2	1	1,0	1,0 ¹

* = faible nombre d'échantillons ;

¹: échantillon < VMR

Le tableau 8 présente les diamètres aérodynamiques médians en masse (MMAD) et les déviations standards géométriques (GSD) calculés pour les échantillons de poussières et de béryllium prélevés à l'aide des impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD}. Les MMAD les plus élevés sont observés dans l'entreprise Mg-1-2 pour les échantillons en poste fixe et en poste personnel prélevés durant les activités de réfection des fours.

Tableau 8 : Moyenne des MMAD¹ et des GSD² pour les aérosols échantillonnés avec les impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD}

Entreprises	Sierra (poste fixe)			Sierra (poste personnel)			MOUDI ^{MD}		
	N	Moyenne MMAD	Moyenne GSD	N	Moyenne MMAD	Moyenne GSD	N	Moyenne MMAD	Moyenne GSD
Poussières									
Mg-1-1	4	8,6	9,5	6	17	20	4	2,1	4,5
Mg-1-2	4	25	12	5	28	4,4	3	17	12
Al-1-1	3	12	3,3	3	16	2,9	3	7,9	4,1
Al-1-2	8	12	3,2	5	9,4	2,8	6	5,5	4,5
Al-2	4	8,2	6,9	2	25*	5,3	1	4*	14
Al-3	8	11	2,6	4	8,9	4,1	4	11	5,9
Béryllium									
Mg-1-1	---	**	**	4	28	4,4	2	1,8*	6,8
Mg-1-2	1	28*	2,1	4	29	2,6	3	**	**
Al-1-1	2	8,3*	5,2	2	9,6	3,8	2	3,7*	3,3
Al-1-2	7	11	3,2	5	8,9	3,3	6	5,5	5,5
Al-2	5	8,4	3,7	1	9,4*	2,4	---	**	**
Al-3	6	15	2,9	3	8,7	3,1	3	10	5,6

¹: MMAD = (Mass Median Aerodynamic Diameter) = diamètre aérodynamique médian en masse (μm);

²: GSD = (Geometric Standard Deviation) = déviation standard géométrique;

* = faible nombre d'échantillons ; ** = Be non détecté sur les étages;

N = nombre d'échantillons

Finalement, le tableau 9 présente le sommaire de l'étendue des résultats de contamination de surface (frottis) prélevés en des endroits à proximité des zones d'échantillonnage en postes fixe et personnel. Quelques prélèvements ont été effectués directement sur le visage et le cou des travailleurs à la fin de leur quart de travail.

Tableau 9 : Échantillons de contamination de surface (frottis)

Entreprises	N	Surface ($\mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$)	N	Visage et cou (μg)
Mg-1-1	10	< VMR – 265	6	< VMR – 0,11
Mg-1-2	0	-	0	-
Al-1-1	11	0,01 - 130	0	-
Al-1-2	5	1,3 – 7,8	0	-
Al-2	14	< VMR – 2,8	0	-
Al-3	0	-	3	0,17 – 1,2

6. DISCUSSION

6.1 Concentrations comparées aux valeurs de référence

Les mesures ont été effectuées sur une période couvrant la durée de certaines tâches spécifiques et ce, afin de comparer l'efficacité des capteurs. Les concentrations de poussières et de béryllium ont quand même été comparées aux valeurs de référence, même si les résultats n'ont pas été ajustés pour une période de 8 heures. Ainsi, tel que rapporté au tableau 2, le niveau de poussières de la plupart des prélèvements en poste fixe est inférieur à 10 mg/m^3 (poussières inhalables et totales) et à 3 mg/m^3 (poussières respirables), à l'exception de l'aluminerie Al-1, où les valeurs de référence sont dépassées - de 10 à 14% - lors des deux interventions (Al-1-1 et Al-1-2). Le taux de dépassement de la VEMP pour les concentrations de poussières en poste personnel est plus fréquent et plus élevé (11 à 100 %) qu'en poste fixe. De façon similaire, pour les concentrations de béryllium, les dépassements de la VEMP de $0,15 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ sont plus fréquents en poste personnel qu'en poste fixe. Pour l'ensemble de ces résultats, les taux de dépassement sont observés le plus souvent pour l'échantillonnage en poussières inhalables.

6.2 Concentrations en fonction des entreprises et des postes

Les concentrations de poussières mesurées sont très variables pour les différentes entreprises. En effet, des différences importantes ont été observées dans les concentrations médianes en fonction du type d'échantillonneur, pour les postes fixes et, de façon plus marquée, pour les postes personnels (tableau 3). Les résultats démontrent également que les concentrations en poste personnel sont généralement plus élevées qu'en poste ambiant (tableau 7), ce qui est confirmé par différentes études portant sur l'évaluation de l'exposition au béryllium (*Kent, 2001; Barnard, 1996*) ou à d'autres contaminants (*Lange, 1999; 2000a; 2000b; Purdham, 1993; Hori, 1993*). Toutefois, l'entreprise Al-1-2, présente des concentrations plus élevées en poste fixe qu'en poste personnel. Cette exception s'explique par le fait que les postes fixes étaient éloignés des postes personnels et qu'une source de poussières (station de nettoyage automatique) était localisée entre ces deux postes alors que, lors de la première intervention (Al-1-1), le poste fixe était situé beaucoup plus près des travailleurs. Un large ventilateur sur pied a été utilisé surtout lors de la deuxième intervention qui s'est déroulée en été (Al-1-2), forçant ainsi l'air de la station automatique non étanche vers la zone d'échantillonnage en poste fixe. Cette observation montre l'importance de documenter les différentes variables pouvant influencer la concentration de contaminants, lors de l'évaluation de l'exposition des travailleurs (*Dufresne, 2009*). Cela démontre également la complexité des procédés dans la relation entre les concentrations en zone respiratoire et en poste ambiant, tel que décrit par un modèle d'exposition par inhalation (*Cherrie, 2004*).

Les concentrations médianes de béryllium suivent une tendance similaire à ce qui a été observé avec les concentrations de poussières (tableau 4). Les concentrations de béryllium pour les postes personnels sont généralement plus élevées que pour les postes fixes, à l'exception d'Al-1-2, pour les raisons discutées plus haut.

À la fonderie Mg-1-1, où des lingots d'aluminium-béryllium sont ajoutés au magnésium dans le four, les concentrations de Be en poste fixe se situent près de la limite de détection de la méthode analytique, tandis que les concentrations mesurées pour certains postes personnels sont près ou

excèdent la VEMP. Des différences significatives ont été observées entre les postes personnels et les postes ambiants lors de la réfection des fours à l'entreprise Mg-1-2 (tableau 7). La localisation du poste fixe était au niveau du plancher à environ deux mètres du puits du four, d'une profondeur de trois à cinq mètres, où les travailleurs s'activaient à l'émaillage des parois (figure 1). Le confinement du travailleur fait en sorte que la concentration de poussières est plus élevée dans sa zone respiratoire qu'en poste fixe, éloigné de la source de génération des poussières. Cette tâche représente un risque accru d'exposition pour les travailleurs.

6.3 Concentrations en fonction des tâches et des matières premières

Une analyse des moyennes (ANOM) des données provenant de toutes les entreprises a été réalisée pour vérifier l'égalité des moyennes de population pour le béryllium avec chacun des échantillonneurs utilisés. Les résultats démontrent que les moyennes ne sont pas toutes équivalentes ($\alpha = 0,05$). Cette analyse confirme que les tâches réalisées durant les interventions pour les différentes entreprises étaient différentes. La moyenne de la concentration de béryllium à l'entreprise Mg-1-2 est statistiquement différente des autres.

Le béryllium retrouvé dans les aérosols des alumineries provient principalement de l'alumine (Lindsay, 2006 ; Thomassen, 2005). Les interventions Al-1-1 et Al-1-2, réalisées à 18 mois d'intervalle dans la même aluminerie, appuient les résultats de Lindsay *et al*, montrant une diminution marquée de la concentration de béryllium dans l'air, en poste fixe et en poste personnel (tableau 4), lorsque la source d'alumine a passé d'un contenu en Be de 3 $\mu\text{g/g}$ à 1 $\mu\text{g/g}$. Les concentrations de Be dans l'air pour certains échantillons des poussières inhalables, totales et respirables peuvent quand même excéder la VEMP de 0,15 $\mu\text{g/m}^3$, même après réduction du contenu en Be dans l'alumine. Des concentrations importantes de Be, jusqu'à 17 $\mu\text{g/m}^3$, ont été observées en zone respiratoire chez le préposé au broyage du bain pour la préparation des échantillons analysés par les laboratoires de l'entreprise Al-2. Ces résultats suggèrent que le Be, probablement sous la forme de fluorure (Lindsay, 2006), peut être concentré dans le bain électrolytique des alumineries.

6.4 Teneur en béryllium dans les aérosols

La teneur moyenne en Be dans l'air ($\mu\text{g}_{\text{Be}}/\text{g}_{\text{poussières}}$) prélevé par les différents capteurs dans une même industrie est relativement constante pour les postes fixes et plus variable pour les postes personnels (Tableau 5). Toutefois, cette teneur peut varier d'une entreprise à l'autre. Les échantillons en postes fixes de l'entreprise Mg-1-1 ont un contenu moyen en Be très faible (1 $\mu\text{g/g}$) tandis que le contenu en Be de l'entreprise Al-2 est de plus de 150 $\mu\text{g/g}$.

À l'entreprise Mg-1-2, une différence statistique ($p=0,045$) est observée entre le contenu en Be du poste fixe (15 $\mu\text{g/g}$) et celui des postes personnels (35 $\mu\text{g/g}$). Lors de l'intervention dans cette entreprise, le béryllium était généré principalement par attrition durant les activités d'émaillage des parois du four pour les postes personnels et par attrition et condensation à partir d'un four adjacent pour les échantillons des postes fixes, situés à plusieurs mètres des travailleurs.

Par contre, à l'entreprise Al-2, la teneur en Be est statistiquement plus élevée ($p=0,014$) en poste ambiant (153 $\mu\text{g/g}$) qu'en poste personnel (80 $\mu\text{g/g}$). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le poste fixe était situé près de l'entonnoir où étaient déversées les poussières pour les

répartir dans les porte-échantillons. Un jet d'air était également mis en marche pour nettoyer l'entonnoir entre chaque échantillon, ce qui générait un nuage de poussière dans l'air.

6.5 Concentrations en fonction du type d'échantillonneur

6.5.1 IOM (fraction inhalable)

Une large dispersion des rapports de concentrations, normalisées par rapport à la concentration évaluée avec l'échantillonneur IOM, a effectivement été observée pour les différents capteurs d'échantillonnage, tel que montré dans le tableau 6. La médiane des rapports de concentrations médianes de poussières pour les postes fixes diminue selon : IOM (1) > Sierra (0,76) > cassette 37 mm (0,61) > MOUDI (0,51) > cyclone (0,13). La même tendance est observée pour les concentrations de béryllium en poste fixe : IOM (1) > Cassette 37 mm (0,69) > Sierra (0,66) > MOUDI (0,54) > cyclone (0,20). L'ordre est légèrement modifié en poste personnel, pour les poussières et le béryllium : IOM > Impacteur > Cassette 37 mm > Cyclone. Les médianes des rapports de concentrations médianes de poussières et de Be sont plus faibles en poste personnel qu'en poste fixe, pour les échantillonnages avec cassette 37 mm et le cyclone, tandis qu'elles sont comparables pour les échantillonnages avec l'impacteur Sierra. Le béryllium a été détecté dans les poussières inhalables à un niveau pouvant dépasser largement la VEMP.

Les échantillonneurs ont une efficacité variable en fonction du diamètre aérodynamique des particules, de la vitesse d'entrée, de la forme et de la dimension de l'orifice, de la dimension du corps auquel ils sont attachés, de la vélocité et de la direction du vent externe. Tous ces déterminants peuvent affecter l'efficacité de collection des capteurs (*Baron, 1998; NIOSH, 2003*).

L'ACGIH a adopté en 2009 une valeur de TLV®-TWA de 0,05 µg/m³ (poussières inhalables). Les échantillonnages de la fraction inhalable permettent le prélèvement d'une plus grande quantité de poussières sur un spectre granulométrique plus grand, ce qui constitue un avantage pour être en mesure de rencontrer les limites de détection des méthodes analytiques. La valeur minimale rapportée (VMR) de béryllium est de 0,0005 µg, que ce soit pour un filtre provenant d'une cassette 37 mm ou d'un filtre provenant d'un IOM. La mesure des aérosols inhalables devrait donc être encouragée pour estimer le risque d'exposition au béryllium du moins jusqu'à ce qu'une relation dose/réponse claire soit établie pour les différents capteurs d'échantillonnage (*Harper, 2006*).

6.5.2 Cassette 37 mm (fraction « totale »)

La performance inférieure de la cassette 37 mm devant l'échantillonneur IOM a déjà été rapportée (*Mark, 1986*) et a, depuis, été largement décrite dans de nombreuses études (*de Vocht, 2006; Kriech, 2004; Demange, 2002; Tsai, 2001, 1996a, 1996b, 1995; Lidén, 2000; Martin, 1998; Spear, 1997; Noto, 1996; Werner, 1996; Wilsey, 1996*). Des comparaisons entre les échantillonneurs de poussières inhalables et totales ont aussi montré une large variabilité pour différents environnements de travail (*Davis, 1999*). Les résultats de la majorité des échantillons appariés de notre étude ont donné des rapports de concentration de poussières (totales/inhalables) variant de 0,21 à 0,82 qui tendent à être plus faibles pour l'entreprise Mg-1-2, où l'aérosol est composé de particules plus grosses. Une étude comparable sur plusieurs centaines d'échantillons

appariés a également montré une surestimation des résultats de poussière inhalable par rapport à ceux de poussière totale. Le rapport poussières inhalables/totales varie de 1,2 à > 3, et tend à être plus élevé pour les milieux de travail où la taille de l'aérosol est plus grosse. Par contre, lorsque les particules sont fines, comme pour les fumées de soudage, les résultats des poussières inhalables et des poussières totales sont comparables (*Werner, 1996*).

Le béryllium a été détecté à un niveau pouvant dépasser la VEMP dans les poussières totales, mais à des niveaux moindres que dans les poussières inhalables.

6.5.3 Cyclone (fraction respirable)

Les concentrations médianes de poussières et de Be obtenues avec le cyclone (fraction respirable), en poste fixe et en poste personnel, sont inférieures à celles mesurées avec les autres capteurs (tableaux 3 et 4). Les rapports des concentrations médianes du cyclone normalisées à IOM, présentés au tableau 6, montrent également la sous-évaluation en poussières respirables comparativement aux autres capteurs d'échantillonnage, autant pour les postes fixes que pour les postes personnels. Ce qui est prévisible, étant donné que le cyclone récolte un sous-ensemble de la fraction recueillie par les autres échantillonneurs. Le béryllium n'a pas été détecté ou est présent en concentrations se situant près de la limite de détection dans la poussière respirable, mais a été détecté à un niveau pouvant dépasser largement la VEMP dans les poussières totales et surtout dans les poussières inhalables. Ce qui laisse supposer que le Be serait plutôt présent au sein des particules plus grosses que la fraction respirable (diamètre aérodynamique > 4 µm).

Le béryllium est reconnu comme un cancérogène par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC), en relation possible avec la concentration de Be respirable (*WHO, 2001*). Du point de vue clinique, les granulomes sont surtout présents dans la région où se font les échanges gazeux, mais ont aussi été observés sur les parois de l'arbre trachéo-bronchique, atteignable par des poussières de granulométrie compatible avec la fraction inhalable (*Newman, 2003*).

6.5.4 Impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD}

Les concentrations de poussières et de Be prélevés à l'aide des impacteurs Sierra^{MD} et MOUDI^{MD} sont également sous-estimées, mais de façon moindre que les autres échantillonneurs, comparativement à ce qui a été mesuré à l'aide du capteur IOM. L'impacteur Sierra n'est pas adéquat pour prélever des aérosols composés de particules de diamètre supérieur à 20 µm, à moins que l'orifice d'entrée ait été modifié afin de simuler l'échantillonneur IOM (*Kerr, 2001 ; Wu, 2007*). Il n'y a pas d'explication semblable pour la sous-estimation de l'impacteur MOUDI^{MD} en relation avec l'efficacité de l'orifice. La masse totale de poussières n'a toutefois pas été corrigée pour les pertes sur les parois internes du MOUDI.

Tel que montré au tableau 8, les MMAD des poussières et de Be estimés avec les impacteurs Sierra, en poste fixe et en poste personnel, sont généralement plus élevés que ceux estimés avec l'impacteur MOUDI. Ces résultats pourraient être expliqués par les corrections appliquées pour les pertes sur les parois avec le Sierra, qui ne sont pas réalisables avec le MOUDI. Les MMAD estimés dans la zone respiratoire des travailleurs sont généralement plus élevés que leurs équivalents en poste fixe. Ce qui pourrait s'expliquer par la proximité du poste fixe avec le poste personnel.

Les valeurs les plus élevées de MMAD ont été observées à l'entreprise Mg-1-2, lors de la réfection des fours. La tâche effectuée par les travailleurs consistait à fragmenter les parois des fours. Un tel procédé, par attrition, a pour effet de générer des poussières, dont la distribution de la taille des particules est étendue. Il n'y a pratiquement pas de fractions fines de poussières sur les étages du Sierra en poste personnel durant la réfection des fours. Cependant, en poste fixe, un mélange de particules fines et grosses est observé; les particules fines pouvant provenir d'un four adjacent en opération et situé près du poste d'échantillonnage, d'où émanait un nuage visible de fumées.

La distribution de la taille des particules pour les échantillons prélevés avec le Sierra en poste fixe, à l'entreprise Mg-1-1, montre une prépondérance de la fraction fine, tandis que les particules sont plus grosses en zone respiratoire. En fait, le poste fixe était localisé au centre de la fonderie pendant que les fours étaient en opération, d'où la présence de poussières plus fines ou de fumées. Les travailleurs effectuaient plusieurs tâches dans la fonderie, dont la coupe des lingots en aluminium-béryllium, une activité qui est connue pour générer des particules de taille plus grande (*Hoover, 1990*).

Lorsque le nombre d'échantillons était suffisant, les moyennes des MMAD des poussières dans les alumineries étaient comparables en fonction des différentes tâches. Les résultats de la présente étude ne peuvent donc être comparés à ce qui a été observé dans des milieux impliquant le broyage de minerais et la manipulation de poudre, où des particules plus larges sont générées (*Thorat, 2003*).

6.6 Échantillons de contamination de surface

Les résultats des prélèvements par frottis dans certaines entreprises ne permettent pas la comparaison entre les différentes interventions, à l'exception de l'aluminerie Al-1. En effet, une diminution importante de la contamination de surface a été observée lorsque la teneur en Be dans l'alumine est passée de 3 à 1 µg/g (ppm). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette variation, dont un entretien ménager réalisé entre les interventions, des échantillonnages effectués sur des surfaces non équivalentes, etc. De plus, il n'est pas possible d'établir de relation entre les résultats de contamination de surface et les concentrations de Be dans l'air. Jusqu'à 1,2 µg de Be a été retrouvé sur la peau des travailleurs (visage et le cou). En absence de valeur de référence pour la peau, le principe de prudence devrait s'appliquer afin de s'assurer d'une protection cutanée adéquate. En effet, l'apport de l'absorption cutanée est de plus en plus suspecté dans le développement de la sensibilisation (*Tinkle, 2003; Day, 2006*). L'exposition cutanée aux sels solubles de béryllium ainsi qu'aux particules insolubles de béryllium de faible granulométrie ($\leq 1 \mu\text{m}$), qui peuvent franchir les barrières cutanées, pourrait contribuer au développement de la BeS. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à une exposition cutanée : le béryllium peut être transféré à la peau directement par différentes sources (air, surfaces ou vêtements) lors de divers procédés, incluant les travaux de nettoyage et de décontamination (*Schneider, 1999*).

6.7 Limite de l'étude

Les concentrations de béryllium pour certains échantillons recueillis sont à la limite de détection de la méthode analytique. Ce qui peut limiter les comparaisons entre les différents types d'échantillonnage ou donner lieu à plus d'incertitude concernant l'établissement de profils d'exposition.

Une convention d'échantillonnage définit l'efficacité de l'échantillonnage en fonction du diamètre aérodynamique pour un échantillonneur idéal. Toutefois, des déterminants, tels que la distribution de la taille des particules, qui peut varier dans les milieux de travail, la vitesse et la direction du vent, la proximité de la source d'émission, les habitudes de travail et la tâche peuvent affecter le rapport de concentration entre les capteurs d'échantillonnage (*Lidén, 2006*). Ceci limite la possibilité d'utiliser les rapports obtenus entre les concentrations observées pour les différents capteurs à d'autres situations ou milieux de travail.

Plus de recherche serait nécessaire afin de déterminer les distributions de taille des particules et de mieux comprendre le comportement des aérosols.

7. CONCLUSION

Les concentrations de poussières et de béryllium ont été comparées aux valeurs de référence, bien que les résultats n'aient pas été ajustés sur une période de 8 heures. Ainsi, dans les fonderies de magnésium et dans les alumineries, le niveau de poussières de la plupart des prélèvements est inférieur aux valeurs recommandées (inhalables, totales ou respirables). Par contre, les concentrations de béryllium mesurées dans les entreprises évaluées, lors de différentes activités, peuvent excéder la VEMP de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tel qu'attendu, les concentrations mesurées en poste personnel sont généralement supérieures aux concentrations en poste fixe, situés généralement près de la zone où les travailleurs exécutent leurs tâches.

Malgré une diminution de la teneur en Be dans la poussière, lorsque la concentration de Be dans l'alumine a été réduite de 3 à $1 \mu\text{g}/\text{g}$, lors d'un changement de la source d'approvisionnement, la concentration de Be aéroporté peut encore excéder la VEMP. La teneur en Be dans l'alumine serait un facteur déterminant de la concentration de Be observée dans l'air.

Les échantillonnages de la fraction inhalable (IOM) permettent le prélèvement d'une plus grande quantité de poussières, et surtout de Be, en comparaison avec les mesures effectuées en échantillonnages de poussières totales (cassette 37 mm), respirables (cyclone SKC) et avec l'impacteur Sierra^{MD}, en poste personnel et en poste fixe, et en comparaison avec l'impacteur MOUDI^{MD}, en poste fixe.

Bien que les comparaisons de la présente étude soient basées sur un nombre limité d'échantillons, les résultats suggèrent que la méthode d'échantillonnage peut avoir un effet substantiel sur la concentration mesurée, surtout pour l'évaluation de l'exposition au béryllium. Ces différences observées dans l'efficacité des échantillonnages devraient donc être prises en compte dans l'établissement des valeurs d'exposition au béryllium.

L'échantillonnage des aérosols inhalables serait la méthode de choix recommandée pour estimer le risque d'exposition au béryllium, jusqu'à ce qu'une relation dose/réponse claire soit établie pour les différents capteurs d'échantillonnage.

8. RECOMMANDATIONS

La mesure des aérosols inhalables devrait donc être encouragée pour estimer le risque d'exposition au béryllium du moins jusqu'à ce qu'une relation dose/réponse claire soit établie pour les différents capteurs d'échantillonnage et que les mécanismes conduisant au développement de la maladie soient élucidés.

Il y aurait lieu d'explorer de façon plus approfondie les résultats des impacteurs pour mieux situer la distribution du Be sur les différentes tranches granulométriques.

Lorsque l'évolution des méthodes de caractérisation le permettra, il faudra mieux définir la nature chimique des poussières dans les entreprises. Est-ce que les composés du Be dans les alumineries sont présents sous la forme de sels solubles, tel le BeF ou sous une forme non soluble, tel l'oxyde de BeO ?

Les entreprises avec béryllium doivent s'assurer que leur programme de prévention couvre non seulement la protection respiratoire, mais aussi la maîtrise de l'exposition cutanée, la contamination des vêtements, la propreté de la zone de travail et la réduction de la migration des particules de béryllium.

9. RÉFÉRENCES

ACGIH TLVs® and BEIs® based on the documentation of the Threshold Limit Value for chemical substances and physical agents & Biological Exposure Indices. ACGIH, Cincinnati (2009).

Barnard, A.E., J. Torma-Krajewski and S.M. Viet. Retrospective beryllium exposure assessment at the Rocky Flats Environmental Technology Site. *Am Ind Hyg Assoc J* 57(9):804-808 (1996).

Baron, P.A.. Personal aerosol sampler design: A review. *Appl Occup Environ Hyg* 13(5):313-320 (1998).

Boucher D. Communication personnelle dans le cadre de la *Réunion annuelle des membres des comités des maladies professionnelles pulmonaires*. IRSST, Montréal. 28 novembre 2008.

Cherrie, J.W. Personal and static sample measurements are related. *Occup Environ Med* 61(4):374 (2004).

Clinkenbeard, R.E., E.C. England, D.L. Johnson, N.A. Esmen and T.A. Hall. A field comparison of the IOM inhalable aerosol sampler and a modified 37-mm cassette. *Appl Occup Environ Hyg* 17(9):622-627 (2002).

CSST (Commission de la santé et de la sécurité du travail). Opération Béryllium. Activités dans les établissements du secteur de la première transformation des métaux et dans certains établissements où s'effectuent des opérations de fonderie. Rapport d'étape déposé au comité technique du conseil d'administration sur le béryllium (No 3.69). Montréal, le 11 mai 2004.
http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/6BE18DFD-A96A-4E1D-8E69-6AC769F73624/4480/DC_200_2225.pdf

Cummings, K.J., A.B. Stefaniak, M.A. Virji and K. Kreiss. A reconsideration of acute beryllium disease. *Environ Health Perspect.* 117(8): 1250-56 (2009).

Davies, H.W., K. Teschke and P.A. Demers. A field comparison of inhalable and thoracic size selective sampling techniques. *Ann Occup Hyg* 43(6):381-392 (1999).

Day, G.A., A.B. Stefaniak, A. Weston and S.S. Tinkle. Beryllium exposure: dermal and immunological considerations. *Int Arch Occup Environ Health.* 79: 161-164 (2006).

de Vocht, F., D. Huizer, M. Prause, K. Jakobsson, B. Peplonska, K. Straif and H. Kromhout. Field comparison of inhalable aerosol samplers applied in the European rubber manufacturing industry. *Int Arch Occup Environ Health* 79(8):621-629 (2006).

Demange, M., P. Gorner, J.M. Elcabache and R. Wrobel. Field comparison of 37-mm closed face cassettes and IOM samplers. *Appl Occup Environ Hyg* 17(3):200-208 (2002).

Deubner D., Kelsh M., Shum M., Maier L., Kent M., Lau E. Beryllium sensitization, chronic beryllium disease, and exposures at a beryllium mining and extraction facility. *App Occu Environ Hyg.* 16(5): 579-592 (2001).

Dion, C. et G. Perrault. Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de béryllium, Synthèse des bonnes pratiques. IRSST, 26 p. (2004)
http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst_878.html

DOE. Department of Energy. Chronic beryllium disease prevention program. Office of Environment, Safety and Health, Department of Energy. Final rule. *Federal Registry*; 64: 68854–914 (1999).

Dufresne, A., Dion, C., Cloutier, Y., Viau, S. and Perrault, G. Beryllium aerosol characteristics in the magnesium and aluminum transformation industry in Quebec: A comparison of four different sampling methodologies. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 6:687-697 (2009).

Haberman A.L., Pratt M. and Storrs F.J. Contact dermatitis from beryllium in dental alloys. *Contact dermatitis.* 28 (3):157-162 (1993).

Harper, M. A review of workplace aerosol sampling procedures and their relevance to the assessment of beryllium exposures. *J Environ Monit* 8(6):598-604 (2006).

Henneberger P.K., Cumro D., Deubner D.C., Kent M.S., McCawley M., Kreiss K. Beryllium sensitization and disease among long-term and short-term workers in a beryllium ceramics plant. *Int Arch Occup Environ Health.* 74: 167-176 (2001).

Hoover, M.D., G.L. Finch, J A Mewhinney and A.F. Eidson. Release of aerosols during sawing and milling of beryllium metal and beryllium alloys. *Appl Occup Environ Hyg* 5:787-791 (1990).

Hori, H., T. Higashi, A. Fujino, H. Yamato, S. Ishimatsu, T. Oyabu and I Tanaka. Measurement of airborne ceramic fibres in manufacturing and processing factories. *Ann Occup Hyg* 37(6):623-629 (1993).

Hoflich, B.L., S. Weinbruch, R. Theissmann, H. Gorzawski, M. Ebert, H.M Ortner, A. Skogstad, D.G. Ellingsen, P.A. Drablos and Y. Thomassen. Characterization of individual aerosol particles in workroom air of aluminium smelter potrooms. *J Environ Monit.* 7(5): 419-24 (2005)

Hornung, R.W. and L.D. Reed. Estimation of average concentration in the presence of nondetectable values. *Appl Occup Environ Hyg* 5(1):46-51 (1990).

INSPQ. Le test sanguin de prolifération lymphocytaire au béryllium (BeLPT) – de la théorie à la pratique. M. Poulin et S. Ricard. INSPQ, Montréal (2004).
<http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/282-TestSanguinLymphocytaireBeryllium.pdf>

IRSSST. Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail. 8e édition, revue et mise à jour. IRSSST, Montréal (2005).

<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSSST/t-06.pdf>

IRSSST. Consignes d'utilisation de la trousse #3080, frottis de surface pour le béryllium avec chiffon humide. IRSSST, Montréal (2008).

<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/fr/Labos/consigne3080.pdf>

Kelleher P.C., Martyny J.W., Mroz M.M., Maier L.A., Ruttenber A.J., Young D.A., Newman L.S. (2001). Beryllium particulate exposure and disease relations in a beryllium machining plant. *Occup Environ Med.* 43(3): 238-249 (2001).

Kent, M.S., T.G. Robins and A.K. Madl. Is total mass or mass of alveolar-deposited airborne particles of beryllium a better predictor of disease? A preliminary study of a beryllium processing facility. *Appl Occup Environ Hyg* 16(5):539-558 (2001).

Kerr, S.M., J.H. Vincent and G. Ramachandran. A new approach to sampling for particle size and chemical species 'fingerprinting' of workplace aerosols. *Ann Occup Hyg* 45(7):555-568 (2001).

Kolanz M.E., Madl A.K., Kelsh M.A., Kent M.S., Kalmes R.M., Paustenbach D.J. A comparison and critique of historical and current exposure assessment methods for beryllium: implications for evaluating risk of chronic beryllium disease. *Appl Occup Env Hyg.* 16(5): 593-614 (2001).

Kreiss K., Mroz M.M., Newman L.S., Martyny J., Zhen B. Machining risk of beryllium disease and sensitization with median exposure below 2 µg/m³. *Am J Ind Med.* 30: 16-25 (1996).

Kriech, A.J., L.V. Osborn, H.L. Wissel, J.T. Kurek, B.J. Sweeney, and C.J. Peregrine. Total versus inhalable sampler comparison study for the determination of asphalt fume exposures within the road paving industry. *J Environ Monit* 6(10):827-833 (2004).

Lange, J.H.. A Statistical evaluation of asbestos air concentrations. *Indoor & Built Environ* 8(5):293-303 (1999).

Lange J.H., B.D. Kuhn, K.W. Thomulka and S.L.M Sites. A study of area and personal airborne asbestos samples during abatement in a crawl space. *Indoor & Built Environ* 9:192-200 (2000a).

Lange, J.H., and K.W. Thomulka. Air sampling during asbestos abatement of floor tile and mastic. *Bull Environ Contam Toxicol* 64(4):497-501 (2000b).

Lidén, G. and M. Harper. Analytical performance criteria. The need for an international sampling convention for inhalable dust in calm air. *J Occup Environ Hyg* 3(10):D94-D101 (2006).

Lidén G., B. Melin, A. Lidblom K. Lindberg and J.-O. Norén. Personal sampling in parallel with open-face filter cassettes and IOM samplers for inhalable dust-implications for occupational exposure limits. *Appl Occup Environ Hyg* 15(3):263-276 (2000).

Lindsay, S.J. and C.L. Dobbs. Beryllium in pot room bath. Light metals 2006. proceedings of the technical sessions presented by the TMS Aluminum Committee at the 135th TMS Annual Meeting . San Antonio, Texas, USA, March 12-16, 2006. Edited by J. Galloway, TMS (The Minerals, Metals and Materials Society): 95-100 (2006).

Lodge J.P. Jr. and Chan T.L., Eds. AIHA Monograph Series. Cascade Impactor Sampling & Data Analysis. Edited by AIHA 2700 Prosperity Avenue, Suite 250, Fairfax, VA 22301, 171 p. (1986).

Maier LA. Beryllium health effects in the era of the beryllium lymphocyte proliferation test. Appl Occup Environ Hyg 16(5): 514-520 (2001).

Mark, D. and J.H. Vincent. A new personal sampler for airborne total dust in workplaces. Ann Occup Hyg 30(1):89-102 (1986).

Martin, J.R. and D.M. Zalk. Comparison of total dust / inhalable dust sampling methods for the evaluation of airborne wood dust. Appl Occup Environ Hyg 13(3):177-182 (1998).

Martyny, J. W., Hoover, M. D., Mroz, M. M., Ellis, K., Maier, L. A., Sheff, K. L., et al. Aerosols Generated During Beryllium Machining. J Occup Environ Med 42(1) (2000).

Newman, L.S. Practical Approach to Chronic Beryllium Disease. Presentation during Colloquium sponsored by the National Jewish Medical and Research Center. Denver, Colorado (2003).

Newman, L.D. Scope of the problem: Industrial dissemination of Beryllium and disease. Communication durant la Conférence internationale de recherche sur le béryllium. Montréal (2005).

<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/Be-2005/Session-3/Newman.pdf>

NIOSH. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). Factors affecting Aerosol sampling. P.A. Baron. Chapitre O. pp 184-207 (2003). <http://www.cdc.gov/NIOSH/nmam/pdfs/chapter-o.pdf>

Noto, H., K. Halgard, H.L. Daae, R.K. Bentsen and W. Eduard. Comparative study on an inhalable and total dust sampler for personal sampling dust and polycyclic aromatic hydrocarbons in the gas and particulate phase. Analyst 121(9):1191-1196 (1996).

O'Shaughnessy, P.T., J. Lo, V. Golla, J. Nakatsu, M.I. Tillery and S. Reynolds. Correction of sampler-to-sampler comparisons based on aerosol size distribution. J Occup Environ Hyg 4(4):237-245 (2007).

Paustenbach, D.J., Madl, A.K. and Greene, J.F.. Identifying an Appropriate Occupational Exposure Limit (OEL) for Beryllium: Data Gaps and Current Research Initiatives. Appl Occup Environ Hyg 16(5): 527-538 (2001).

Predicala, B.Z. and R.G. Maghirang. Field comparison of inhalable and total dust samplers for assessing airborne dust in swine confinement barns. *Appl Occup Environ Hyg* 18(9):694-701 (2003).

Purdham, J.T., P.R. Bozek and A. Sass-Kortsak. The evaluation of exposure of printing trade employees to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Ann Occup Hyg* 37(1):35-44 (1993).

RSST, Règlement sur la santé et la sécurité du travail. S-2.1, r.19.01, Décret 1120-2006. Éditeur officiel du Québec. Gouvernement du Québec (2007).

http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/lois_et_reglements/liste_reglements.php?alpha=S-2.1#

Rossmann M.D. History of Beryllium disease. Communication durant la Conférence internationale de recherche sur le béryllium. Montréal (2005).

<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSSST/Be-2005/Session-1/Rossmann.pdf>

Rubow, K.L., V.A. Marple, J. Olin and M.A. McCawley. A Personal Cascade Impactor: design, evaluation and calibration. *Am Ind Hyg Assoc J* 48(6):532-538 (1987).

Schneider, T., R. Vermeulen, D.H. Brouwer, J.W. Cherrie, H. Kromhout and C.L. Forth. Conceptual model for assessment of dermal exposure. *Occup Environ Med*. 56: 765-773 (1999).

Soderholm, S.C. Proposal for converting "total" dust limits to inhalable and thoracic limits. *Appl Occup Environ Hyg* 8:453-457 (1993).

Spear, T.M., M.A. Werner, J. Bootland, A. Harbour, E.P. Murray, R. Rossi and J.H. Vincent. Comparison of methods for personal sampling of inhalable and total lead and cadmium-containing aerosols in primary Smelter. *Am Ind Hyg Assoc J* 58(12):893-899 (1997).

Thomassen, Y., D.G. Ellingsen, K. Dah, I. Martinsen, N.P. Skaugset and P.A. Drables. Occupational beryllium exposure in primary aluminium production. Presentation during International Beryllium Research Conference. Montréal, Canada (2005).

<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSSST/Be-2005/Session-8/Thomassen.pdf>

Thorat, D.D., T.N. Mahadevan and D.K. Ghosh. Particle size distribution and respiratory deposition estimates of beryllium aerosols in an extraction and processing plant. *Am Ind Hyg Assoc J* 64(4):522-527 (2003).

Tinckle, S.S., J.M. Antonini, B.A. Rich, J.R. Robert, R. Salmen, K. Depree and E.J. Adkins. Skin as a route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. *Environ Health Perspect*. 111: 1202-1208 (2003).

Tsai, P.J., J.H. Vincent, G.A. Whal and G. Maldonado. Occupational exposure to inhalable and total aerosol in the primary nickel production industry. *Occup Environ Med* 52(12):793-799 (1995).

Tsai, P.J., M.A. Werner, J.H. Vincent and G. Maldonado. Exposure to nickel-containing aerosol in two electroplating shops: comparison between inhalable and total aerosol. *Appl Occup Environ Hyg* 11:484-492 (1996a).

Tsai, P.J., J.H. Vincent, G.A. Wahl and G. Maldonado. Worker exposures to inhalable and total aerosol during nickel alloy production. *Ann Occup Hyg* 40(16):651-659 (1996b).

Tsai, P.J. and J.H. Vincent. A study of worker's exposures to the inhalable and "total" aerosol fractions in the primary nickel production industry using mannequins to simulate personal sampling. *Ann Occup Hyg* 45(5):385-394 (2001).

US Federal Register. Chronic beryllium disease prevention program; final rule, DOE 10 CFR Part 850, 68854-68914. (1999)

<http://www.hss.doe.gov/healthsafety/WSHP/be/docs/berule.pdf>

Vaughan, N.P., C.P. Chalmers and R.A. Botham. Field comparison of personal samplers for inhalable dust. *Ann Occup Hyg* 34(6):553-573 (1990).

Wagner, W. *Magnésium*. Secteur des minéraux et des métaux , Ressources naturelles Canada. (2003). <http://www.nrcan.gc.ca/mms/cmty/contenu/2003/37.pdf>

Werner, M.A., T.M. Spear and J.H. Vincent. Investigation into the impact of introducing workplace aerosol standards based on the inhalable fraction. *Analyst* 121(9):1207-1214 (1996).

WHO (World Health Organization). Beryllium and beryllium compounds. Concise International Chemical Assessment Document 32. World Health Organization, Geneva, 71 p. (2001).

<http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad32.htm>

Wilsey, P.W., J.H. Vincent, M.J. Bishop, L.M. Brosseau and I.A. Greaves. Exposures to inhalable and "total" oil mist aerosol by metal machining shop workers. *Am Ind Hyg Assoc J* 57(12):1149-1153 (1996).

Wu, Y.H. and J.H. Vincent. A modified Marple-type cascade impactor for assessing aerosol particle size distributions in workplaces. *J Occup Env Hyg* 4(10):798-807 (2007).

ANNEXE 1

Entreprise Mg-1-1

Tableau A.1 : Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)	Moy. Arithm. (mg/m ³)	Écart type	Médiane (mg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (mg/m ³)	Valeur seuil* (mg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	5	0,36	1,5	0,73	0,47	0,64	0,63	1,9	1,4	10	0
	Inhalables	7	0,28	1,4	0,76	0,39	0,78	0,67	1,3	1,3	10	0
	Respirables	9	0,27	0,84	0,43	0,20	0,32	0,40	1,5	0,76	3	0
	Sierra ^{MD}	7	0,37	9,6	2,2	3,3	0,70	1,1	3,1	7,4	-	-
	MOUDI ^{MD}	4	0,14	1,1	0,72	0,42	0,83	0,57	2,6	1,1	-	-
Personnel	Totales	7	0,49	4,6	1,3	1,5	0,73	0,93	2,1	3,6	10	0
	Inhalables	9	0,82	10	2,8	2,9	2,2	2,1	2,1	7,1	10	11
	Respirables	8	0,15	0,65	0,32	0,17	0,27	0,28	1,6	0,59	3	0
	Sierra ^{MD}	8	0,54	32	6,1	10,7	2,3	2,3	4,2	24,2	-	-

Tableau A.2 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (µg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	4	0,0006	0,0016	0,001	0,0004	0,0009	0,001	1,5	0,002	0,15	0
	Inhalables	5	0,0008	0,0067	0,002	0,003	0,001	0,002	2,5	0,007	0,15	0
	Respirables	5	0,0004	0,0005	0,0004	0,0001	0,0004	0,0004	1,2	0,001	0,15	0
	Sierra ^{MD}	6	0,0002	0,0006	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003	1,6	0,001	-	-
	MOUDI ^{MD}	3	0,0004	0,0009	0,0006	0,0002	0,0005	0,0006	1,5	0,001	-	-
Personnel	Totales	7	0,0007	0,44	0,07	0,16	0,007	0,006	1,3	0,32	0,15	14
	Inhalables	9	0,001	0,18	0,04	0,06	0,02	0,02	5,4	0,16	0,15	11
	Respirables	8	0,0004 ¹	0,0012	0,0008	0,0003	0,0008	0,0007	1,3	0,001	0,15	0
	Sierra ^{MD}	8	0,003	0,65	0,10	0,22	0,02	0,02	6,1	0,44	-	-

¹ : 2 échantillons < VMR 0,0005µg) pour le béryllium; la concentration a été calculée selon : (VMR / volume) / 2

N = nombre d'échantillons

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures.

Entreprise Mg-1-2

Tableau A.3 : Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	4	0,34	2,0	1,2	0,73	1,3	1,0	2,2	1,9	10	0
	Inhalables	4	0,65	3,3	2,2	1,1	2,4	1,9	2,1	3,2	10	0
	Respirables	4	0,09	0,38	0,27	0,13	0,31	0,23	2,0	0,37	3	0
	Sierra ^{MD}	4	0,51	2,0	1,5	0,7	1,7	1,3	1,9	2	-	-
	MOUDI ^{MD}	4	0,39	2,3	1,4	0,83	1,5	1,2	2,2	2,2	-	-
Personnel	Totales	8	0,07 ¹	47	14	15	7,1	9,2	2,7	41	10	43
	Inhalables	9	6,0	197	59	66	34	34	3,2	126	10	78
	Respirables	6	0,56	19	6,5	8,2	1,7	2,9	4,2	18	3	33
	Sierra ^{MD}	6	5	317	81	126	11	24	5,6	290	-	-

Tableau A.4 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	3	0,005	0,04	0,02	0,017	0,02	0,02	2,7	0,04	0,15	0
	Inhalables	3	0,006	0,05	0,03	0,020	0,03	0,02	2,8	0,045	0,15	0
	Respirables	3	0,0002 ²	0,001	0,0006	0,0006	0,0003	0,0004	2,7	0,001	0,15	0
	Sierra ^{MD}	3	0,02	0,32	0,13	0,16	0,05	0,07	3,9	0,29	-	-
	MOUDI ^{MD}	3	0,006	0,06	0,03	0,03	0,022	0,02	3,2	0,06	-	-
Personnel	Totales	8	0,001 ³	1,7	0,60	0,64	0,42	0,18	11	1,6	0,15	63
	Inhalables	9	0,03	6,7	1,7	2,2	0,84	0,69	5,3	5,6	0,15	78
	Respirables	6	0,006	1,0	0,33	0,45	0,08	0,07	10	0,95	0,15	33
	Sierra ^{MD}	6	0,05	7,4	2,3	3,3	0,35	0,50	8,4	6,9	-	-

¹: 1 échantillon < VMR (25µg) pour les poussières; ^{2,3}: 2 échantillons et 1 échantillon < VMR (0,0005µg) pour le béryllium : la concentration a été calculée selon : (VMR / volume) / 2;

N = nombre d'échantillons

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures.

Entreprise Al-1-1

Tableau A.5: Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	14	1,1	21	5,8	5,6	4,2	4,1	2,3	17	10	14
	Inhalables	10	2,4	16	6,8	4,1	6,1	5,8	1,8	13	10	10
	Respirables	6	0,37	2,1	1,2	0,76	1,0	0,94	2,1	2,1	3	0
	Sierra ^{MD}	3	1,3	6,4	3,1	2,8	1,6	2,4	2,3	5,9	-	-
	MOUDI ^{MD}	3	1,4	6,0	3,9	2,3	4,4	3,3	2,1	5,8	-	-
Personnel	Totales	2	1,3	9,2	5,3	5,7	5,3	3,5	4,0	8,9	10	0
	Inhalables	3	3,0	11	7,8	4,2	9,8	6,8	2,0	11	10	33
	Respirables	3	0,53	2,6	1,3	1,1	0,68	0,98	2,3	2,4	3	0
	Sierra ^{MD}	3	0,93	8,3	5,0	3,7	5,7	3,5	3,2	8,0	-	-

Tableau A.6 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	14	0,09	2,0	0,51	0,52	0,36	0,34	2,5	1,5	0,15	79
	Inhalables	10	0,18	1,66	0,61	0,45	0,55	0,49	2,0	1,3	0,15	100
	Respirables	6	0,04	0,29	0,15	0,11	0,12	0,12	2,2	0,28	0,15	33
	Sierra ^{MD}	2	0,13	0,13	0,13	0	0,13	0,13	1	0,13	-	-
	MOUDI ^{MD}	2	0,13	0,57	0,35	0,31	0,35	0,27	2,8	0,55	-	-
Personnel	Totales	2	0,12	0,78	0,45	0,47	0,45	0,31	3,8	0,75	0,15	50
	Inhalables	3	0,19	2,1	1,0	0,99	0,77	0,68	3,4	2	0,15	100
	Respirables	3	0,08	0,31	0,16	0,14	0,08	0,12	2,2	0,29	0,15	33
	Sierra ^{MD}	2	0,11	0,25	0,18	0,10	0,18	0,17	1,8	0,24	-	-

N = nombre d'échantillons ; NA = non approprié

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures.

Entreprise Al-1-2

Tableau A.7: Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)	Moy. Arithm. (mg/m ³)	Écart type	Médiane (mg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (mg/m ³)	Valeur seuil* (mg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	5	2,6	4,9	4,0	0,93	4,0	3,9	1,3	4,9	10	0
	Inhalables	7	3,9	18	7,7	4,8	6	6,8	1,6	15	10	14
	Respirables	5	0,65	1,1	0,84	0,24	0,71	0,82	1,3	1,1	3	0
	Sierra ^{MD}	8	2,0	8,1	4,1	1,9	3,6	3,8	1,5	7,2	-	-
	MOUDI ^{MD}	7	0,8	4,3	1,8	1,3	1,3	1,5	1,8	3,8	-	-
Personnel	Totales	3	1,6	3,0	2,3	0,70	2,3	2,2	1,4	2,9	10	0
	Inhalables	4	3,2	5,9	4,3	1,2	4,0	4,2	1,3	5,7	10	0
	Respirables	4	0,27	0,53	0,4	0,11	0,41	0,39	1,3	0,50	3	0
	Sierra ^{MD}	5	1,7	3,8	2,4	0,8	2,2	2,3	1,4	3,5	-	-

Tableau A.8 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (µg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	5	0,13	0,24	0,20	0,05	0,23	0,19	1,3	0,24	0,15	60
	Inhalables	7	0,17	0,96	0,39	0,27	0,27	0,33	1,8	0,82	0,15	100
	Respirables	5	0,04	0,07	0,05	0,02	0,05	0,052	1,3	0,07	0,15	0
	Sierra ^{MD}	7	0,10	0,23	0,17	0,05	0,15	0,16	1,4	0,23	-	-
	MOUDI ^{MD}	6	0,03	0,14	0,07	0,04	0,06	0,06	1,6	0,12	-	-
Personnel	Totales	3	0,07	0,19	0,12	0,06	0,09	0,11	1,7	0,18	0,15	33
	Inhalables	4	0,11	0,22	0,18	0,05	0,19	0,17	1,4	0,22	0,15	75
	Respirables	4	0,02	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	1,4	0,04	0,15	0
	Sierra ^{MD}	5	0,08	0,19	0,11	0,05	0,10	0,11	1,4	0,17	-	-

N = nombre d'échantillons ;

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures

Entreprise Al-2

Tableau A.9: Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)	Moy. Arithm. (mg/m ³)	Écart type	Médiane (mg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (mg/m ³)	Valeur seuil* (mg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	4	0,10 ¹	0,30	0,22	0,09	0,24	0,20	1,6	0,29	10	0
	Inhalables	4	0,31	1,3	0,99	0,55	1,0	0,84	2,0	1,5	10	0
	Respirables	2	0,02 ¹	0,08 ¹	0,05	0,04	0,05	0,04	2,8	0,07	3	0
	Sierra ^{MD}	5	0,05 ²	1,3	0,78	0,48	0,97	0,51	3,8	1,2	-	-
	MOUDI ^{MD}	3	0,20	0,45	0,32	0,13	0,30	0,30	1,5	0,44	-	-
Personnel	Totales	2	2,9	7,3	5,1	3,1	5,1	4,6	1,9	7,1	10	0
	Inhalables	3	14	65	34	27	23	27	2,2	61	10	100
	Respirables	2	0,97	1,5	1,2	0,39	1,2	1,2	1,4	1,5	3	0
	Sierra ^{MD}	3	3,3	14	9,3	5,3	11	7,9	2,1	13	-	-

¹: <VMR, < 25µg pour les poussières; la concentration a été calculée selon : VMR / volume) / 2; ²: 1 Sierra dont la majorité des étages < VMR.

Tableau A.10 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (µg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	5	0,02	0,07	0,05	0,02	0,05	0,04	1,6	0,10	0,15	0
	Inhalables	5	0,04	0,08	0,06	0,02	0,07	0,06	1,3	0,08	0,15	0
	Respirables	5	0,01	0,04	0,02	0,01	0,02	0,02	1,6	0,04	0,15	0
	Sierra ^{MD}	4	0,03	0,07	0,05	0,02	0,05	0,05	1,5	0,07	-	-
	MOUDI ^{MD}	2	0,01	0,08	0,04	0,05	0,04	0,02	5	0,07	-	-
Personnel	Totales	3	0,24	0,65	0,45	0,20	0,45	0,41	1,7	0,63	0,15	100
	Inhalables	3	1,0	1,7	1,3	0,36	1,1	1,2	1,3	1,6	0,15	100
	Respirables	3	0,09	0,15	0,12	0,03	0,13	0,10	1,3	0,15	0,15	0
	Sierra ^{MD}	1	0,09	0,09	NA	NA	NA	NA	NA	NA	-	-

N = nombre d'échantillons; NA = non applicable

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures.

Entreprise A1-3

Tableau A.11: Sommaire statistique de la concentration de poussières (mg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)	Moy. Arithm. (mg/m ³)	Écart type	Médiane (mg/m ³)	Moy. Géom. (mg/m ³)	GSD	95e centile (mg/m ³)	Valeur seuil* (mg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	3	1,6	1,8	1,7	0,10	1,7	1,7	1,1	1,8	10	0
	Inhalables	4	0,92	4,6	2,9	1,8	3,1	2,4	2,1	4,5	10	0
	Respirables	4	0,17	0,39	0,30	0,09	0,32	0,28	1,4	0,38	3	0
	Sierra ^{MD}	8	1,4	2,9	2,3	0,49	2,5	2,3	1,3	2,8	-	-
	MOUDI ^{MD}	4	0,45	1,6	1,1	0,50	1,2	1,0	1,8	1,6	-	-
Personnel	Totales	4	1,5	2,5	1,9	0,45	1,8	1,8	1,3	2,4	10	0
	Inhalables	4	3,3	5,4	4,5	1,0	4,7	4,4	1,3	5,4	10	0
	Respirables	4	0,22	0,42	0,28	0,09	0,25	0,27	1,3	0,39	3	0
	Sierra ^{MD}	4	0,87	5,4	3,0	1,9	2,8	2,4	2,2	5,1	-	-

Tableau A.12 : Sommaire statistique de la concentration de béryllium (µg/m³)

Postes	Poussières	N	Min (µg/m ³)	Max (µg/m ³)	Moy. Arithm. (µg/m ³)	Écart type	Médiane (µg/m ³)	Moy. Géom. (µg/m ³)	GSD	95e centile (µg/m ³)	Valeur seuil* (µg/m ³)	% > valeur seuil
Fixe	Totales	4	0,03	0,07	0,06	0,02	0,06	0,05	1,6	0,07	0,15	0
	Inhalables	4	0,01	0,20	0,12	0,09	0,13	0,07	4,0	0,20	0,15	50
	Respirables	4	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	1,5	0,02	0,15	0
	Sierra ^{MD}	7	0,06	0,16	0,11	0,03	0,11	0,10	1,3	0,15	-	-
	MOUDI ^{MD}	3	0,02	0,08	0,05	0,03	0,04	0,04	2,0	0,07	-	-
Personnel	Totales	4	0,04	0,10	0,06	0,02	0,06	0,06	1,4	0,09	0,15	0
	Inhalables	4	0,08	0,18	0,12	0,04	0,12	0,12	1,4	0,17	0,15	25
	Respirables	4	0,01	0,02	0,01	0,003	0,01	0,01	1,2	0,02	0,15	0
	Sierra ^{MD}	4	0,03	0,23	0,12	0,09	0,11	0,09	2,5	0,22	-	-

Pour chacun des impacteurs Sierra, quelques étages < VMR pour les poussières et pour le béryllium.

N = nombre d'échantillons

* : Les valeurs seuils pour les poussières respirables et inhalables (ACGIH 2007), poussières totales et Be (RSST, 2007).

Note : Les concentrations de poussières et de béryllium dans l'air sont des valeurs brutes, elles ne représentent donc pas les valeurs d'exposition moyenne pondérée sur 8 heures.