

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-613



Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de béryllium

Techniques et solutions nettoyantes

*Stéphanie Viau
Chantal Dion
Guy Perrault
André Dufresne*





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 preventionautravail@resourcintegration.ca

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2009
ISBN : 978-2-89631-379-2 (version imprimée)
ISBN : 978-2-89631-380-8 (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,
juin 2009

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-613

Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de béryllium

Techniques et solutions nettoyantes

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.

Stéphanie Viau¹, Chantal Dion², Guy Perrault³ et André Dufresne⁴

Avec la collaboration de :

*Valérie Turcotte^{4,5}, Hooman Golshahi⁴, Bethany Campbell⁴,
Teodor Mocanu⁴, Annie Ouellet⁶ et Pierre-Jean Désormeaux⁶*

¹ IRSST

² Service de la recherche, IRSST

³ Consultant

⁴ Université McGill

⁵ MHV Services d'hygiène industrielle Inc.

⁶ Services et expertises de laboratoire, IRSST

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

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 le réseau de la santé et des services sociaux ainsi que les firmes privées responsables de la surveillance des chantiers de décontamination pour leur aide précieuse dans l'identification des entreprises et leur soutien pendant les interventions. Tous nos remerciements vont également aux établissements qui nous ont accueillis et ont participé activement à l'étude. Nous remercions également Madame Lise Brière pour la révision du texte et Madame Christine Lecours pour sa contribution à la rédaction de ce document.

Cette étude a été cofinancée par l'IRSST et le WorkSafeBC.

SOMMAIRE

La relation entre l'exposition au béryllium (Be) par voie respiratoire et l'atteinte à la santé n'est pas bien définie. La contribution de l'absorption par la voie cutanée a été suggérée pour expliquer le développement de la sensibilisation (BeS). Dans ce contexte, la surveillance des niveaux de contamination des surfaces constitue un outil important de la maîtrise des émissions. De bonnes pratiques de nettoyage des lieux où il y a utilisation ou manipulation de béryllium sont nécessaires afin de prévenir l'accumulation de béryllium sur les surfaces et les outils de travail.

La présente étude a porté sur l'évaluation de : (1) l'efficacité de différentes solutions nettoyantes sur des surfaces de matériaux en cuivre-béryllium (CuBe) et de matériaux sans Be; (2) trois techniques de prélèvement de surface (frottis avec lingettes humides, aspiration de type « micro-vacuum » et colorimétrie avec les ChemTest[®]) et, (3) techniques de nettoyage et de décontamination utilisées sur le terrain.

Les résultats indiquent qu'il est difficile de respecter la valeur seuil de 0,2 µg/100 cm² de Be sur des surfaces en cuivre-béryllium. Par contre, un nettoyage avec un produit neutre ou basique (moins agressif qu'un nettoyant acide) permet de limiter la contamination de surface à un niveau inférieur à 3,0 µg/100 cm² (valeur à respecter dans une zone contenant du Be avec mesures de maîtrise de l'exposition et port d'équipements de protection). Pour la récupération du Be sur une surface de matériaux sans Be, l'efficacité des différentes solutions est semblable, lors des essais en laboratoire ainsi que sur les différentes surfaces évaluées sur le terrain.

En général, les résultats des prélèvements de surface démontrent un meilleur taux de récupération du Be avec les lingettes humides comparativement à la technique d'aspiration lors de l'évaluation en laboratoire ainsi que sur le terrain. La surface (lisse ou poreuse) ainsi que sa condition (état de la peinture, présence d'huile, empoussièrément, etc.) influencent l'efficacité de ces deux types de prélèvement. La technique colorimétrique avec le ChemTest[®] n'a pas été efficace sur les surfaces étudiées sur le terrain. En effet, une grande quantité de poussières sur les surfaces ou la présence d'huile surchargent la surface du filtre et inhibent la réaction colorimétrique. De plus, les résultats positifs avec le ChemTest[®], obtenus dans ces conditions, ne sont pas confirmés par les deux autres techniques. Les essais en laboratoire démontrent clairement que la technique est inefficace en présence d'oxyde de béryllium (BeO).

Dans les lieux où il y a présence de Be, la procédure de décontamination peut varier selon le type de surface à nettoyer. Un cycle de nettoyage comprend habituellement deux étapes : l'aspiration des poussières à l'aide d'un aspirateur muni d'un filtre à haute efficacité (HEPA) et le nettoyage humide avec détergent. Un deuxième cycle de nettoyage est recommandé lorsque la contamination de surface reste supérieure à 0,2 µg/100 cm². Après plusieurs essais de décontamination sur un plancher de béton friable et défraîchi, un scellant a été utilisé. L'exposition des travailleurs aux particules de béryllium durant les travaux de nettoyage varie selon le travailleur et sa méthode de travail, l'outil de travail, la tâche exécutée mais aussi la contamination de surface. Le port des équipements de protection (cutanée et respiratoire) reste nécessaire pour la protection des travailleurs.

Sur la base de ces résultats, un guide sera rédigé pour soutenir les industries où il y a présence de béryllium à élaborer un protocole de nettoyage ou de décontamination afin d'obtenir des niveaux acceptables de béryllium.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	iii
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
2.1 Effets à la santé et surveillance environnementale	3
2.2 Contamination de surface	3
2.3 Méthodes de nettoyage	4
3. OBJECTIF DES TRAVAUX	7
4. DESCRIPTION DES TRAVAUX	9
4.1 Solutions nettoyantes	9
4.1.1 Solutions nettoyantes utilisées	9
4.1.2 Procédures sur les surfaces de cuivre-béryllium.....	10
4.1.3 Procédures dans les boîtes de Pétri	12
4.1.4 Procédures sur le terrain.....	13
4.2 Techniques de prélèvement de surface	14
4.2.1 Techniques de prélèvement de surface	14
4.2.2 Procédures.....	15
4.3 Interventions en milieu de travail	16
4.3.1 Type d'entreprises visitées.....	16
4.3.2 Techniques d'échantillonnage	18
4.4 Analyse des échantillons.....	19
5. RÉSULTATS.....	21
5.1 Solutions nettoyantes	21
5.1.1 Évaluation sur les surfaces en alliage de cuivre-béryllium.....	21
5.1.2 Évaluation des solutions dans des boîtes de Pétri enrichies	25
5.1.3 Évaluation des solutions sur le terrain	26
5.2 Techniques de prélèvement de surface	26
5.2.1 Valeur cible des préparations de composés de béryllium.....	26
5.2.2 Frottis avec les lingettes humides	27
5.2.3 Aspiration (micro-vacuum).....	28
5.2.4 ChemTest® (colorimétrie).....	29
5.2.5 Évaluation des techniques de prélèvement sur le terrain	30
5.3 Techniques de nettoyage et de décontamination	30
5.3.1 Entreprise 1	30
5.3.2 Entreprise 2	31
5.3.3 Entreprise 3	32
5.3.4 Entreprise 4.....	33

6.	DISCUSSION	35
6.1	Solutions nettoyantes	35
6.1.1	Surface en CuBe	35
6.1.2	Taux de récupération.....	36
6.1.3	Évaluation sur le terrain	36
6.2	Techniques de prélèvement de surface	37
6.2.1	Frottis de surface.....	37
6.2.2	Aspiration (micro-vacuum).....	38
6.2.3	ChemTest®	38
6.2.4	Évaluation sur le terrain	39
6.3	Techniques de nettoyage et de décontamination	40
6.3.1	Efficacité des techniques de nettoyage	40
6.3.2	L'exposition des travailleurs au béryllium	41
7.	CONCLUSION	43
8.	RECOMMANDATIONS	45
9.	RÉFÉRENCES	47
	Annexe A : Préparation des composés de béryllium (tests sur les solutions nettoyantes).....	53
	Annexe B : Préparation des composés de béryllium (tests sur les techniques de prélèvement).....	55
	Annexe C : Évaluation des solutions nettoyantes sur le terrain.....	57
	Annexe D : Évaluation des techniques d'échantillonnage de surface sur le terrain.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Nombre de boîtes de Pétri préparées pour l'évaluation des solutions nettoyantes	13
Tableau 2 :	Nombre de boîtes de Pétri préparées pour chaque composé de béryllium	16
Tableau 3 :	Valeur cible de Be pour les solutions / suspension de composé de Be	25
Tableau 4 :	Valeur cible en Be des solutions ou suspensions préparées pour les composés de Be	27
Tableau 5 :	Moyenne des taux de récupération des prélèvements avec lingette humide (même opérateur)	27
Tableau 6 :	Différence inter-individuelle présentée avec la moyenne des taux de récupération des prélèvements avec lingette humide pour les deux opérateurs	28
Tableau 7 :	Moyenne des taux de récupération par aspiration dans les boîtes de Pétri	28
Tableau 8 :	Concentrations de Be des prélèvements de surface lors des travaux (entreprise 1)	30
Tableau 9 :	Prélèvements d'air en zone respiratoire des travailleurs durant les travaux (entreprise 1).....	31
Tableau 10 :	Concentrations de Be des prélèvements de surface lors des travaux (entreprise 2)	31
Tableau 11 :	Prélèvements d'air en zone respiratoire durant les travaux de nettoyage par aspiration (entreprise 2)	32
Tableau 12 :	Concentration de béryllium des prélèvements avec lingettes humides avant et après le nettoyage de deux moules en industrie.....	33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	A - moule avec surfaces d'Al et de CuBe. B – plaques neuves de CuBe.....	10
Figure 2 :	Surfaces évaluées (A2-A4, A6-A8, A10- A12) et surfaces de référence (A1-R, A5-R et A9-R)) pour le moule A (n=12)	11
Figure 3 :	Techniques de nettoyage de la surface des moules et des plaques de CuBe : A – trempage de la lingette dans la solution nettoyante, B – nettoyage de la surface avec la lingette imbibée de la solution, C – brossage de la surface, D – immersion du moule dans l'eau savonneuse.....	12
Figure 4 :	Procédures dans boîtes de Pétri : A – échantillons enrichis de 0,2 µg (BeO), B – échantillonnage des boîtes de Pétri fortifiées.....	13
Figure 5 :	Tests réalisés en parallèle sur l'évaluation des solutions : A - sur une surface en béton peinturé, B – sur un mur de béton.....	14
Figure 6 :	Techniques d'échantillonnage . A – lingettes humides (Ghost Wipe [®]), B – aspiration (micro-vacuum), C – colorimétrie (ChemTest [®])	15
Figure 7 :	Supports collecteurs : A – cassette d'échantillonnage, B - IOM [®] , C - cyclone en aluminium, D - impacteur Sierra [®]	18
Figure 8 :	Concentrations de béryllium sur les différentes surfaces du moule A.....	22
Figure 9 :	Concentrations de béryllium sur les différentes surfaces du moule B.....	23
Figure 10 :	Nettoyage des surfaces (intérieures et extérieures du moule) avec la solution acide	24
Figure 11 :	Concentrations de béryllium sur les plaques de CuBe.....	25
Figure 12 :	Taux de récupération du béryllium dans les boîtes de Pétri	26
Figure 13 :	Prélèvements avec les filtres ChemTest [®] après analyse.....	29
Figure 14 :	Poste ambiant avec collecteurs attachés à la nacelle	32

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 être nocif pour la santé. Les maladies respiratoires liées à ce métal sont reconnues depuis plusieurs années et sont largement étudiées. Entre autres, la béryllose chronique (CBD) 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) qui est asymptomatique (*Newman, 2005*). Ce ne sont pas toutes les personnes sensibilisées au béryllium qui développeront la maladie. Des affections de la peau, de type dermatite de contact, ont aussi été observées chez des travailleurs ayant eu une exposition cutanée au béryllium.

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 CSST 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) (*CSST, 2004*).

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*). Dans le secteur aéronautique, le béryllium fut trouvé dans 28 entreprises sur 117 (21 154 travailleurs). Douze travailleurs de 4 compagnies étaient exposés à des niveaux de béryllium supérieurs à $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, incluant 3 travailleurs d'une compagnie où l'exposition était supérieure à $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (*CSST, 2005*). Les activités de surveillance réalisées dans 83 compagnies du secteur de l'environnement (1900 travailleurs) ont mis en évidence la présence de béryllium dans 26 compagnies où 43 travailleurs étaient exposés à des niveaux supérieurs à $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (*CSST, 2006*). Les hygiénistes du travail du Québec complètent présentement leurs interventions dans les 1200 compagnies du secteur de l'usinage. Il est fort probable que plusieurs industries auront besoin de nettoyer ou décontaminer leurs lieux de travail en raison de la présence de béryllium.

La prévention de la BeS et de la CBD est basée sur la maîtrise de l'exposition dans la zone respiratoire du travailleur. La valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) est de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ selon l'annexe 1 du Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (*2007*). La VEMP précédente de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, toujours en vigueur dans différents pays, ne permet pas d'éviter la sensibilisation au béryllium (*Kreiss, 1996; Henneberger, 2001; Kolanz, 2001; Deubner, 2001*). L'apport de l'absorption cutanée est de plus en plus suspectée dans le développement de la sensibilisation (*Tinkle, 2003; Day, 2006*).

De bonnes pratiques de nettoyage des lieux où il y a utilisation ou manipulation de béryllium sont nécessaires afin de prévenir l'accumulation de béryllium sur les surfaces de travail. Une telle accumulation peut engendrer une re-suspension des particules de béryllium dans l'air de l'aire de travail où ces particules ont été générées ainsi que dans les zones connexes. De plus, la présence de particules de béryllium sur les équipements de travail augmente le potentiel de contact cutané des travailleurs avec le béryllium (*US Federal Register, 1999*).

Lors de la décontamination d'un lieu où il y a présence de béryllium, comme c'est le cas pour d'autres contaminants tels l'amiante et le plomb, des mesures de sécurité doivent s'appliquer pour les travailleurs de l'entretien et pour les personnes travaillant près de la zone à décontaminer. Les techniques utilisées lors de l'entretien des zones ou équipements avec présence de contamination doivent prévenir la dispersion et la re-suspension des poussières. Deux principes de nettoyage sont généralement utilisés : le nettoyage par aspiration à l'aide d'un aspirateur muni d'un filtre à haute efficacité (HEPA) et le nettoyage humide avec détergent.

La présente étude permettra de supporter les industries où il y a présence de béryllium à élaborer un protocole de nettoyage et/ou de décontamination afin d'obtenir des niveaux acceptables de béryllium. L'objectif du projet est la réalisation d'un guide de décontamination qui sera complémentaire à la publication « Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de béryllium, Synthèse des bonnes pratiques » élaborée en 2004 pour répondre à des besoins ponctuels (*Dion, 2004*). Le rapport de recherche présente les études réalisées en laboratoire et sur le terrain qui permettront une meilleure connaissance de l'évaluation de solutions nettoyantes, de trois techniques de prélèvement de surface et des techniques de nettoyage et de décontamination utilisées sur le terrain. Un guide de décontamination sera publié séparément.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Effets à la santé et surveillance environnementale

La relation entre l'exposition respiratoire au béryllium et l'atteinte à la santé n'est pas bien établie et l'importance d'une autre voie d'absorption, la voie cutanée, a été suggérée pour le développement de la sensibilisation (BeS) (*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 (*Tinkle, 2003; Day, 2006*). Plusieurs facteurs peuvent contribuer à une exposition cutanée selon le modèle de Schneider (*Schneider, 1999*). 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.

Une étude réalisée par Sackett *et al.* (*Sackett, 2004*) a mis en évidence l'apparition de nouveaux cas de BeS et CBD après le début des opérations de nettoyage dans des usines du U.S. Department of Energy (DOE). Les auteurs insistent sur l'importance de la surveillance environnementale et médicale des travailleurs au poste de nettoyage, susceptibles d'être exposés à des concentrations élevées de béryllium. Le Cardiff Atomic Weapons Establishment (AWE), au Royaume-Uni, a utilisé du béryllium de 1961 à 1997 et a instauré son propre programme de maîtrise du béryllium (Cardiff's beryllium control program). Ce dernier fait intervenir les principes stricts d'hygiène du travail : maîtrise du procédé, maîtrise au niveau des travailleurs, maîtrise du matériel et surveillance médicale (*Johnson, 2001*).

Les auteurs d'une étude, réalisée dans une usine de céramique contenant de l'oxyde de béryllium (BeO), concluent qu'un programme de prévention permet de réduire les cas de sensibilisation chez des travailleurs nouvellement embauchés, durant leur première année à l'emploi (*Cummings, 2007*). Ce programme doit couvrir 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.

La troisième Conférence internationale sur le béryllium, tenue à Philadelphie en octobre 2007, a résumé l'état des connaissances sur le sujet (*Conférence, 2007*). Les principales conclusions étaient à l'effet que la valeur de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ACGIH, TWA) ne protège pas la santé des travailleurs pour tous les types de particules de béryllium (forme, taille et composition chimique); que la peau représenterait un risque d'absorption qui peut conduire à la BeS et qu'il reste des incertitudes concernant les aspects immunologiques et génétiques de la BeS et de la CBD.

Les connaissances actuelles supportent la nécessité de réduire l'exposition des travailleurs par l'absorption de poussières de béryllium par les voies respiratoires et cutanées en maîtrisant les sources d'émission.

2.2 Contamination de surface

La surveillance des niveaux de contamination des surfaces constitue un outil important dans la maîtrise des émissions (*Dion, 2004*). En effet, l'échantillonnage des poussières de surface est utile dans différentes situations pour : (1) déceler la présence de Be dans les établissements ; (2) découvrir les sources de contamination au Be ; (3) vérifier l'efficacité des procédures d'entretien ménager ou des activités de décontamination ; (4) confirmer l'absence de

contamination croisée entre les zones considérées avec présence de béryllium et les zones sans béryllium ; (5) s'assurer du bon nettoyage d'un objet, équipement ou établissement devenant accessible au public.

Il n'y a pas de réglementation au Québec sur la contamination de surface par le béryllium. Dans son programme de prévention, le « Department of Energy » (DOE) indique des niveaux de contamination de surface à respecter dans les milieux avec et sans béryllium (*US Federal Register, 1999*). Ces niveaux « acceptables » ont été retenus comme valeurs-seuils au Québec. La concentration de béryllium ne doit pas excéder $0,2 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ sur les surfaces de travail, d'équipements et d'objets afin d'être considérées « exemptes de béryllium ». La valeur de $3,0 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ a été retenue comme valeur maximale dans les zones de travail avec béryllium durant les périodes non opérationnelles. Cependant, dans ce dernier cas, des mesures de protection générales et individuelles doivent être appliquées et un programme d'entretien ménager doit être mis en place. Le DOE ne précise pas la méthode d'échantillonnage de surface à utiliser pour l'évaluation de la contamination de surface, hormis une recommandation sur l'utilisation de supports humides pour une meilleure récupération des particules.

2.3 Méthodes de nettoyage

Deux procédés de nettoyage sont couramment utilisés pour limiter la contamination de surface par des poussières : le nettoyage par aspiration avec l'emploi d'un aspirateur avec filtre à haute efficacité (filtre HEPA) et le nettoyage humide à l'aide d'un détergent. Un aspirateur muni de filtre HEPA est capable de retenir 99,97 % des particules de dimension égale ou supérieure à $0,3 \mu\text{m}$. L'utilisation de l'air comprimé et des méthodes de nettoyage sèches est prohibée (*US Federal Register, 1999*). Le procédé humide peut se faire à l'aide d'une éponge, d'un chiffon ou d'une vadrouille jetables ou réutilisables après un nettoyage. La vadrouille éponge pour le plancher n'est pas recommandée car elle ne fait qu'étendre les particules sur le sol sans les ramasser (*US HUD, 1995*). L'utilisation du jet d'eau à haute pression peut être utile dans les grands espaces et sur les surfaces difficiles à décontaminer. Plusieurs ouvrages décrivent les principaux éléments de sécurité lors de l'utilisation de cet appareil (*ASTM, 1998; INRS, 2005*).

Lorsqu'il y a présence de poussière de plomb, trois étapes de nettoyage sont suggérées : (1) aspiration avec filtre HEPA afin d'enlever le maximum de poussière et de débris, (2) nettoyage humide avec un agent nettoyant et rinçage pour déloger la poussière de la surface, et (3) une deuxième aspiration avec filtre HEPA pour enlever les particules délogées mais non récupérées lors du nettoyage humide (*US HUD, 1995; US Navy Environmental Health Center, 2002*). Un temps d'attente d'une heure est suggéré avant la deuxième aspiration afin de permettre aux particules, qui ont pu être libérées de la surface et entraînées dans l'air lors du nettoyage, de se redéposer. La deuxième aspiration contribuerait à une réduction accrue du plomb sur les surfaces, surtout lorsqu'elles sont difficiles à nettoyer (*Yiin, 2004, Grinshpun, 2002*). Un deuxième nettoyage est aussi suggéré pour les surfaces rugueuses comme le bois. La deuxième aspiration après le nettoyage humide pourrait ne pas être requise si le niveau de concentration acceptable de plomb est atteint après les deux premières étapes (*Dixon, 1999*).

Toujours dans la problématique du plomb, le U.S. Department of Housing and Urban Development (*US HUD 1995*) identifie des éléments pouvant expliquer la difficulté de réaliser un nettoyage jugé efficace : (1) faible valeur de référence; (2) travailleurs

inexpérimentés qui privilégieraient le nettoyage de la poussière visible alors que la poussière invisible est aussi importante; (3) méthodes de travail évitant la propagation de la poussière et entreposage des poussières dans des contenants étanches ; (4) respect des échéanciers et des coûts des travaux. Ces éléments peuvent être transposés au nettoyage et à la décontamination du béryllium, pour lesquels la rareté des données sur l'efficacité des méthodes de travail souligne l'utilité de poursuivre les recherches dans ce domaine.

3. OBJECTIF DES TRAVAUX

L'objectif général de cette étude visait l'élaboration d'un guide (français et anglais) comprenant une description exhaustive des pratiques d'hygiène du travail et de prévention qui devraient être appliquées dans le cadre d'activités de nettoyage et de décontamination.

Les objectifs plus spécifiques permettaient :

- d'identifier les moyens de maîtrise de la dispersion des contaminants dans l'air et d'identifier les équipements de protection requis pour les travailleurs effectuant des travaux de nettoyage et de décontamination;
- d'évaluer l'efficacité du nettoyage ou de la décontamination par différentes solutions nettoyantes sur divers types de surface à décontaminer;
- d'évaluer l'efficacité de différentes techniques de nettoyage et de décontamination;
- d'élaborer une liste de pratiques ou d'étapes de nettoyage ou de décontamination incluant la surveillance environnementale.

4. DESCRIPTION DES TRAVAUX

L'estimation de la contamination de surface et les taux de récupération ont été réalisés en laboratoire sur des pièces en cuivre-béryllium (CuBe) ainsi que dans des boîtes de Pétri enrichies (ajout d'une concentration connue) en béryllium afin d'évaluer l'efficacité de différentes solutions nettoyantes. De plus, trois techniques de prélèvements de surface ont été étudiées en laboratoire dans des boîtes de Pétri enrichies avec différents composés de béryllium. Parallèlement à ces tests, l'équipe de recherche a accompagné des entreprises dans des activités de nettoyage ou de décontamination. Un suivi des travaux a alors été réalisé par l'entremise de prélèvements d'échantillons d'air et de surface.

4.1 Solutions nettoyantes

L'efficacité de six solutions nettoyantes a été évaluée en laboratoire sur une surface en alliage de cuivre-béryllium (CuBe), dans des boîtes de Pétri enrichies ainsi qu'en entreprises sur différentes surfaces contaminées au béryllium. Les solutions nettoyantes ont été sélectionnées à partir des données de la littérature ou parce qu'elles étaient déjà utilisées dans les entreprises.

4.1.1 Solutions nettoyantes utilisées

Le choix des solutions nettoyantes a été justifié en fonction de leur utilisation actuelle dans certaines entreprises. Le produit Liquinox[®] de la compagnie Alconox[®] a été utilisé pour des travaux de décontamination exécutés à Rocky Flats aux Etats-Unis (*Rocky Flats, 1997*). Suite à une discussion avec ce fournisseur, en fonction des besoins exprimés, trois détergents ont été retenus pour le projet : Citranox[®] (solution acide), Luminox[®] (solution basique) et Alconox[®] (solution basique). Les solutions ont été préparées conformément aux directives des bulletins techniques du fournisseur (*Alconox[®], site internet*). Une autre solution testée était le produit de ménage « Fantastik[®] » de la compagnie S.C. Johnson (solution alcaline) qui est utilisé pour la décontamination de surface contaminée au béryllium, notamment par le « Los Alamos National Laboratory (LANL) » (*Taylor, 2002*). Une solution de NaCl 5 % (pH de 6,57) à 21 °C et à 60 °C ainsi que l'eau du robinet ont été étudiées à titre comparatif. Le produit nettoyant industriel et dégraissant « Z-99[®] » est un sel inorganique (solution basique) utilisé par la compagnie détentrice des moules qui ont servi de surface en CuBe dans cette étude. Ce produit a été étudié lors des tests réalisés en laboratoire ainsi que sur le terrain. Les deux solutions suivantes ont fait l'objet des tests réalisés sur le terrain seulement : le produit « Ledizolv[®] », utilisé et conseillé pour le nettoyage de la peinture contaminée au plomb et le « Resolve[®] », un produit nettoyant, dégraissant liquide, basique (pH de 12).

Les fiches signalétiques ainsi que les bulletins techniques de ces produits sont disponibles sur Internet¹.

¹ http://www.alconox.com/static/msds/msds_alconox.asp
http://www.alconox.com/static/msds/msds_citranox.asp
http://www.alconox.com/static/msds/msds_luminox.asp
<http://www.additionconfort.com/Fichessignaletiques/fantastik.pdf>
<http://www.ledizolv.com/LearnAbout/LedizolvMSDS/lzmsds.asp>
<http://maunco.com/photos/custom/MSDS/Z-99%20msdseng.pdf>
<http://www.resolvesolvents.co.uk/pages/index.asp?area=4&area2=7>

4.1.2 Procédures sur les surfaces de cuivre-béryllium

L'objectif de l'évaluation du nettoyage d'une surface constituée de béryllium par diverses solutions nettoyantes, était de vérifier la possibilité de diminuer la quantité de ce contaminant disponible à la surface. En effet, des quantités importantes de béryllium avaient été observées, lors de prélèvements de routine réalisés à l'aide de lingettes humides (Ghost Wipe[®]), sur les surfaces de pièces en alliage de cuivre-béryllium (2 % Be).

La première surface utilisée provenait de deux moules (A et B) en aluminium (Al) et en alliage de CuBe (2 % Be) qui servaient à la production de bouteilles de plastique (figure 1 A). Les moules ont été divisés en douze surfaces dont la superficie variable (45 à 135 cm²), a été estimée à l'aide d'une règle. Les surfaces ont été classées selon leur localisation (à l'intérieur et à l'extérieur du moule) ainsi que selon leur aspect visuel (surface poreuse ou lisse). La figure 2 présente l'identification des différentes surfaces pour le moule A, la même procédure a été appliquée pour le moule B. Chaque solution nettoyante était appliquée sur deux surfaces (généralement, une à l'intérieur et l'autre à l'extérieur du moule). Pour les deux moules, trois surfaces (A1-R, A5-R et A9-R) n'ont reçu aucun traitement de nettoyage et ont été utilisées comme référence.

La deuxième surface à l'étude correspondait à cinq plaques neuves de CuBe (1,6 à 2 % Be), d'environ 2 mm d'épaisseur et d'une surface de 100 cm², de la compagnie Brush Wellman (figure 1 B). Le recto de la plaque était utilisé pour la réalisation des tests de prélèvement de surface avec les solutions et le verso servait de référence. La fiche signalétique de la surface de CuBe est disponible sur le site Internet de Brush Wellman².

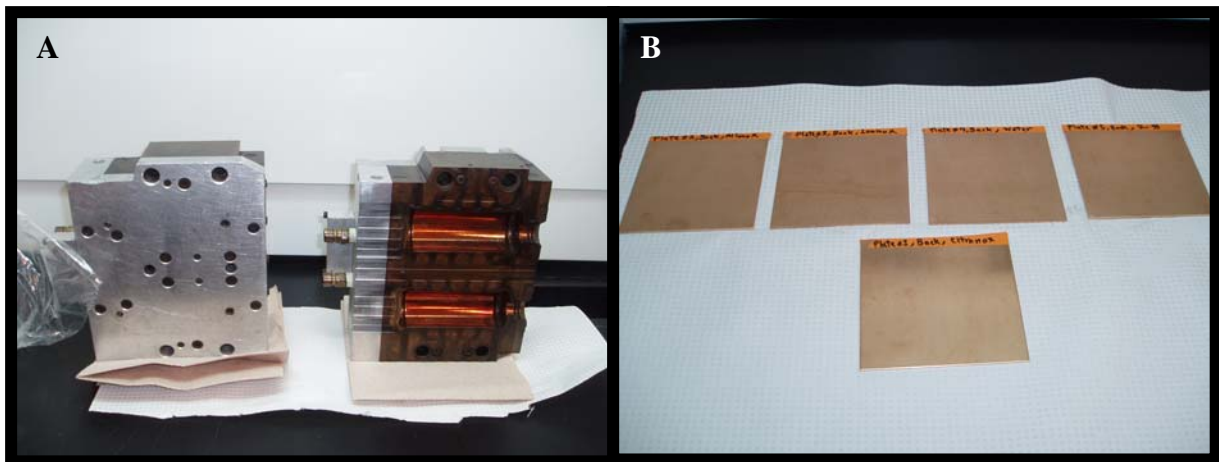


Figure 1 : A - moule avec surfaces d'Al et de CuBe. B – plaques neuves de CuBe

² <http://www.brushwellman.com/EHS/MSDS/A08.pdf>

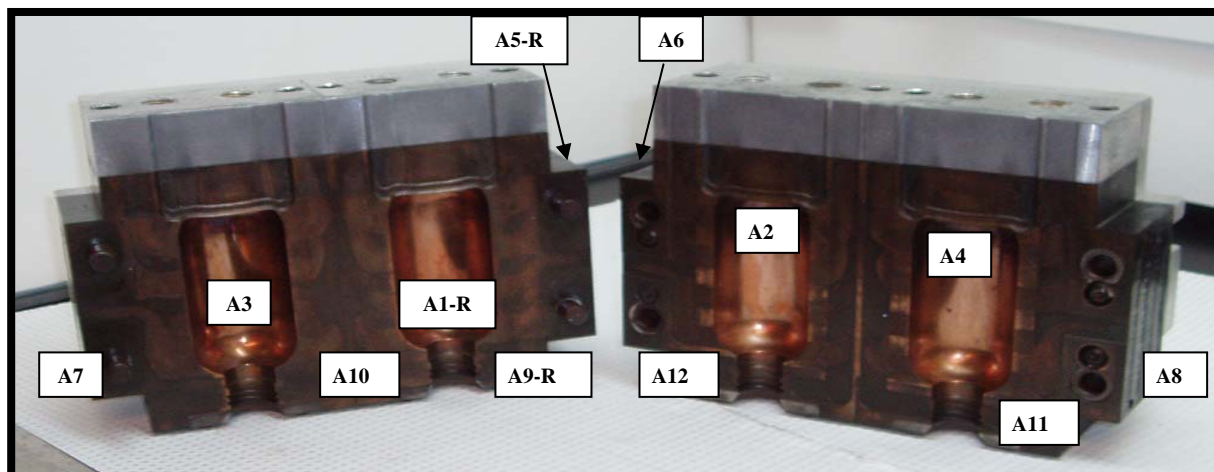


Figure 2 : Surfaces évaluées (A2-A4, A6-A8, A10- A12) et surfaces de référence (A1-R, A5-R et A9-R) pour le moule A (n=12)

A1-R = Référence pour A2-A4 ; A5-R = référence pour A6-A8 ; A9-R = Référence pour A10-A12 ;
A9-R-A12 = surfaces poreuses

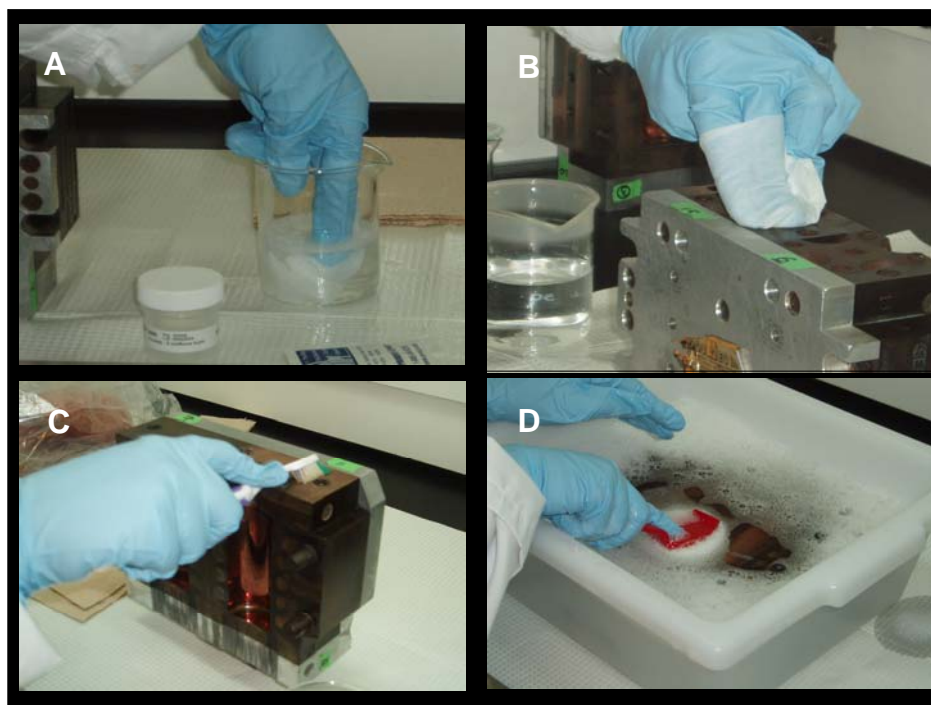
Les prélèvements de surface ont été effectués par frottis avec des lingettes humides (Ghost Wipe[®]), conformément aux procédures d'utilisation de la trousse #3080 disponibles sur le site de l'IRSST (IRSST, 2008).

Pour chacune des solutions nettoyantes, un protocole en quatre étapes a été respecté :

1. Un prélèvement de surface avec un Ghost Wipe[®] a d'abord été réalisé sur la surface. En plus d'estimer la contamination de départ de la surface, ce prélèvement permettait de vérifier l'homogénéité de la teneur en béryllium sur toutes les surfaces.
2. Un prélèvement ou une série de plusieurs prélèvements sur la même surface a été effectué avec un Ghost Wipe[®] trempé dans une solution nettoyante (figure 3, A et B). Deux lingettes pour un même échantillon pouvaient être utilisées dépendamment de la contamination visible sur la première lingette.
3. Toutes les surfaces nettoyées ont été rincées avec de l'eau dé-ionisée à trois reprises. Cette étape permettait d'enlever les sels et les autres résidus possibles sur la surface.
4. Un prélèvement avec un Ghost Wipe[®] permettait finalement de vérifier s'il y avait présence de Be résiduel à la surface après le nettoyage.

Toutes les étapes du protocole ont été réalisées sous une hotte équipée d'un système de ventilation locale. Après chaque journée de manipulation, l'espace de travail était nettoyé et des prélèvements de surface étaient effectués afin de s'assurer de l'absence de béryllium.

Deux autres essais de décontamination ont été effectués sur la surface du moule A : brossage des surfaces de CuBe à l'aide d'une brosse à dents trempée dans la solution nettoyante et immersion du moule dans de l'eau savonneuse avec brossage de la surface à l'aide d'une brosse à récurer (figure 3, C et D).



**Figure 3 : Techniques de nettoyage de la surface des moules et des plaques de CuBe :
A – trempage de la lingette dans la solution nettoyante, B – nettoyage de la surface avec
la lingette imbibée de la solution, C – brossage de la surface, D – immersion du moule
dans l'eau savonneuse**

4.1.3 Procédures dans les boîtes de Pétri

Des expérimentations ont été réalisées dans les vases de Pétri, en laboratoire, afin de comparer, en conditions contrôlées, les solutions nettoyantes et les méthodes d'échantillonnage en fonction des différents composés de béryllium.

Deux solutions (acétate de Be ($\text{Be}_4\text{O}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_6$) et chlorure de béryllium (BeCl_2)) et une suspension (oxyde de béryllium (BeO)), à une concentration d'environ $0,2 \mu\text{g}$ de béryllium, ont été déposées, à l'aide d'une pipette, dans des boîtes de Pétri (figure 4, A). Après une évaporation de la phase liquide pendant environ 70 heures sous la hotte, les dépôts des composés de Be ont été prélevés, sur la surface du Pétri, avec les lingettes humides imbibées des solutions à l'étude (figure 4, B).

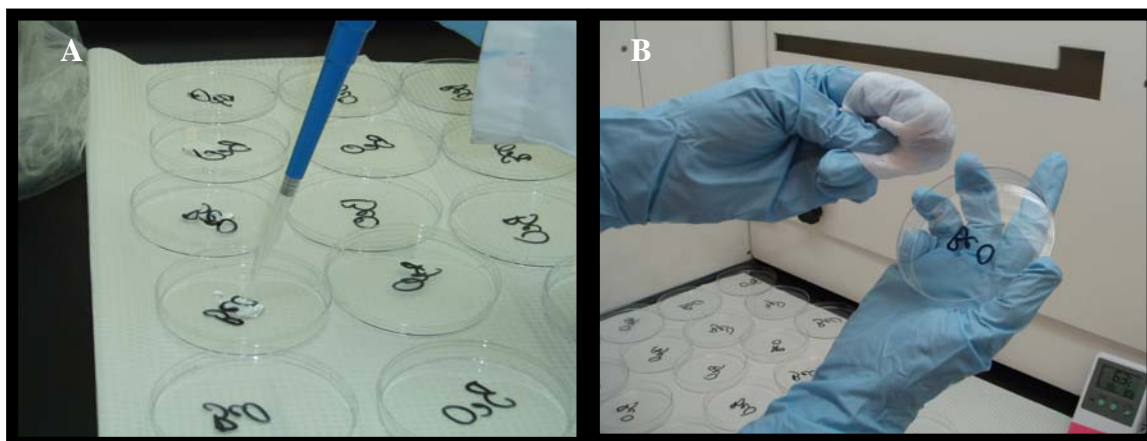


Figure 4 : Procédures dans boîtes de Pétri : A – échantillons enrichis de 0,2 µg (BeO), B – échantillonnage des boîtes de Pétri fortifiées

La procédure suivie pour la préparation des solutions et de la suspension est décrite à l'Annexe A. Les préparations ont été analysées à l'aide de la technique du plasma par induction avec couplage à un spectromètre de masse (ICP-MS) afin d'obtenir la concentration de béryllium réelle qui sera utilisée comme valeur cible. Des prélèvements de surface ont été prélevés dans 108 boîtes de Pétri (tableau 1) et le taux de récupération a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de récupération (\%)} = \frac{\text{Quantité de béryllium prélevée avec la solution nettoyante (\mu\text{g})}}{\text{Valeur cible de la préparation (\mu\text{g})}} * 100$$

Tableau 1 : Nombre de boîtes de Pétri préparées pour l'évaluation des solutions nettoyantes

	Nombre d'échantillons							Total
	Alconox®	Citranox®	Luminox®	Eau	NaCl 5 % (21 °C)	NaCl 5 % (60 °C)	Témoïn	
Acétate de Be	6	6	6	6	6	6	3	39
BeCl ₂	6	6	6	6	NA	NA	3	27
BeO	6	6	6	6	6	6	6	42
Total	18	18	18	18	12	12	12	108

NA : Non applicable

4.1.4 Procédures sur le terrain

Le protocole utilisé en laboratoire pour l'évaluation des solutions nettoyantes a été appliqué en entreprises sur différentes surfaces (figure 5). Les entreprises visitées sont : une industrie de plastique avec utilisation de moules en CuBe (entreprise 1), une usine de fabrication de pièces composées de béryllium (entreprise 2) et, une fonderie (entreprise 5).

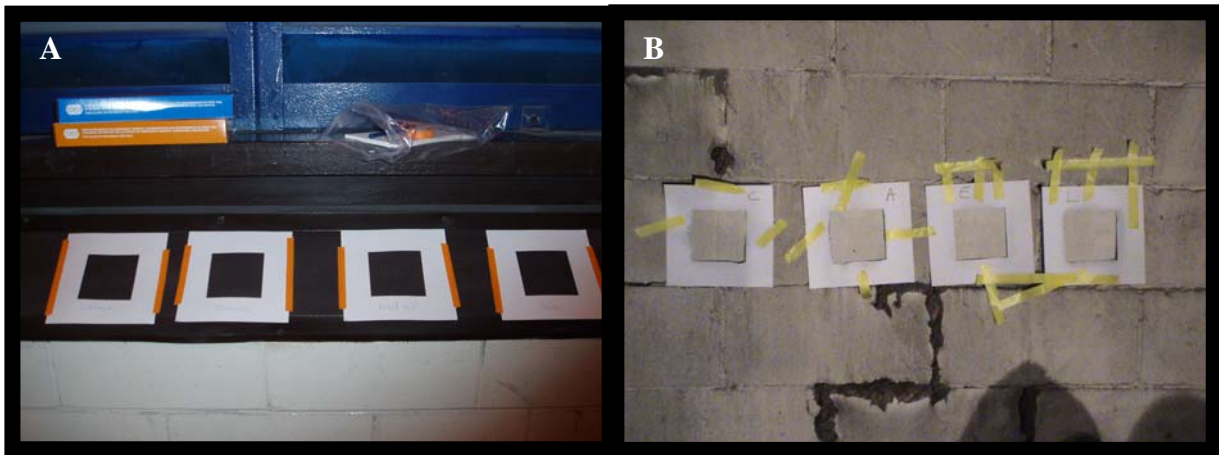


Figure 5 : Tests réalisés en parallèle sur l'évaluation des solutions :
A - sur une surface en béton peinturé, B – sur un mur de béton

4.2 Techniques de prélèvement de surface

La deuxième étude réalisée en laboratoire consistait en l'évaluation de trois techniques d'échantillonnage : frottis avec lingettes humides (Ghost Wipe[®]), aspiration (micro-vacuum) et colorimétrie (ChemTest[®]). Cinq paramètres ont été considérés dans cette étude : la technique d'échantillonnage (n = 3), le composé de béryllium (n = 4), la quantité de béryllium (n = 3), le type de surface (n = 3) ainsi que la variabilité inter-individuelle (pour les frottis uniquement).

4.2.1 Techniques de prélèvement de surface

La technique d'échantillonnage avec lingettes humides, emballées individuellement (Ghost Wipe[®]), appliquée selon la méthode ASTM D 6966 (2003), est la plus couramment utilisée (figure 6 A).

Parmi les techniques d'échantillonnage utilisant l'aspiration, le système « micro-vacuum » est le plus approprié pour le prélèvement sur une surface de 100 cm² (figure 6 B). Le système combine la méthode standardisée ASTM 7144 (2005) et une méthode non standardisée utilisée pour la surveillance nationale du plomb par le U.S. Department of Housing and Urban Development (HUD) (Farfel, 1994). Il s'agit d'une pompe pouvant fournir un débit de 16 L/min couplée à une cassette d'échantillonnage de 37 mm en polystyrène qui contient une membrane en esters de cellulose mélangés (ECM) d'une porosité de 0,8 µm, à laquelle a été ajouté un tube collecteur d'environ 5,5 cm de longueur, biseauté à 45°.

La troisième technique d'échantillonnage, le ChemTest[®] (Microteq[®], *site internet*), utilise un système avec filtres permettant de détecter la présence de béryllium sur le site même de l'échantillonnage en quelques heures selon une méthode colorimétrique (figure 6 C). La présence de Be sur la surface occasionne un changement de couleur du filtre (du rose au bleu) grâce à un enchaînement de réactions chimiques. Les filtres sont vendus dans une boîte contenant tout le matériel nécessaire pour exécuter la méthode de prélèvement et d'analyse : 20 filtres, une solution de mouillage (eau dé-ionisée), trois solutions de développement, 20 plaques de développement et 20 sacs pour entreposer les filtres après manipulation. La limite de détection de la méthode est de 0,2 µg de béryllium par filtre, soit la valeur seuil pour confirmer la présence de béryllium sur une surface de 100 cm².



Figure 6 : Techniques d'échantillonnage . A – lingettes humides (Ghost Wipe®),
B – aspiration (micro-vacuum), C – colorimétrie (ChemTest®)

4.2.2 Procédures

Des boîtes de Pétri en plastique, en verre et en aluminium ont été enrichies avec une quantité connue (0,1; 0,2 et 0,4 µg) d'un composé de béryllium (acétate de Be, BeCl₂, AlBeMet et BeO). Les prélèvements de surface (frottis avec Ghost Wipe®, aspiration et ChemTest®) ont été effectués dans les boîtes de Pétri suite à une période d'évaporation d'environ 70 heures dans une hotte de laboratoire. La procédure suivie pour la préparation des solutions et des suspensions est présentée à l'annexe B. Le taux de récupération a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de récupération (\%)} = \frac{\text{Quantité de béryllium prélevée par la technique de nettoyage (\mu\text{g})}}{\text{Valeur cible de la préparation (\mu\text{g})}} * 100$$

Un total de 192 boîtes de Pétri a été échantillonné (tableau 2). Les manipulations ont été effectuées par la même personne. Toutefois, trois lingettes humides supplémentaires ont été utilisées par un deuxième opérateur sur les trois surfaces, avec une quantité de 0,4 µg de Be. Ceci a permis d'évaluer la différence inter-individuelle dans le prélèvement à l'aide des lingettes humides.

Tableau 2 : Nombre de boîtes de Pétri préparées pour chaque composé de béryllium

Surface	µg de Be	Nombre d'échantillons			Total
		lingette humide	aspiration	ChemTest®	
Plastique	0,1	3	3	3	9
	0,2	3	3	3	9
	0,4	6	3	3	12
	Témoin	2	2	2	6
Verre	0,4	6	NA	NA	6
Aluminium	0,4	6	NA	NA	6
Total		26	11	11	48

NA : Non applicable

Toutes les étapes du protocole ont été réalisées sous une hotte équipée d'un système de ventilation locale. Après chaque journée de manipulation, l'espace de travail était nettoyé et des prélèvements de surface étaient effectués afin de s'assurer de l'absence de béryllium.

L'évaluation des trois techniques d'échantillonnage de surface a aussi été réalisée sur le terrain dans trois entreprises : institution d'enseignement en technique dentaire (entreprise 3), entreprise de fabrication de moules (entreprise 6) et entreprise de fabrication de bouteilles de plastique utilisant des moules en CuBe (entreprise 7).

4.3 Interventions en milieu de travail

Afin d'évaluer l'efficacité des techniques de nettoyage dans divers environnements de travail, l'équipe de recherche a accompagné quatre entreprises dans le cadre de leurs activités ponctuelles de nettoyage ou de décontamination. Trois d'entre elles réalisaient une décontamination complète des lieux de travail (entreprises 1, 2 et 3). Une autre entreprise devait aménager un espace « contaminé au béryllium » avec des mesures de protection des travailleurs et établir un protocole de nettoyage des lieux (entreprise 4).

Une intervention dans une aluminerie a permis d'effectuer des tests de solutions nettoyantes mais aucune activité de décontamination ou de nettoyage n'était réalisée (entreprise 5). Finalement, deux entreprises ont été visitées afin d'évaluer les trois techniques de prélèvement de surface (entreprises 6 et 7).

4.3.1 Type d'entreprises visitées

4.3.1.1 Entreprise 1

Cette entreprise fabrique des contenants de plastique destinés au domaine alimentaire. Le procédé de fabrication par extrusion comprend des moules dont certains sont composés, en partie, d'un alliage de cuivre et de béryllium (CuBe). Une décontamination complète de l'atelier où étaient usinés les moules, a été réalisée à l'aide d'une aspiration des poussières et des débris suivie d'un nettoyage humide avec un nettoyant et dégraissant liquide (Resolve®). Des prélèvements de surface ont été réalisés dans cette entreprise afin d'évaluer différentes solutions nettoyantes.

4.3.1.2 Entreprise 2

Cette entreprise était spécialisée dans la fabrication de pièces de métal pour des industries militaires, aérospatiales et de télécommunication. Au moment de la décontamination, la compagnie n'occupait plus les lieux depuis plus de deux ans. En raison de l'étendue de la zone à décontaminer et de la présence de nombreuses machines contaminées, les activités de décontamination se sont déroulées sur une période de près de deux ans. Dans le cadre de cette étude, sept interventions ont été effectuées sur une période d'environ un an. Notons que la contamination était présente sur des surfaces variées, verticales et horizontales (ciment, acier, béton peinturé, béton poreux, métal, etc.). Les interventions ont été organisées de façon à ce que des prélèvements d'air et de surface soient réalisés à chaque étape de la décontamination. Ces étapes consistaient en une aspiration, principalement des surfaces horizontales, suivie d'un nettoyage humide avec un solvant industriel (Ledisolv[®]) à l'aide d'un jet à haute pression. Des prélèvements de surface ont été réalisés dans cette entreprise dans le but d'évaluer l'efficacité des différentes solutions nettoyante.

4.3.1.3 Entreprise 3

L'entreprise 3 est une institution scolaire collégiale dispensant une formation en technique dentaire où l'usage de certains matériaux contenant du béryllium était parfois requis. Ces matériaux n'étaient plus utilisés depuis une dizaine d'années. Une contamination de béryllium était présente à l'intérieur des locaux d'enseignement où étaient effectués les travaux pratiques (bord de fenêtre, dessus de luminaire, dessus de conduit de ventilation) ainsi que dans les conduits de ventilation. Une décontamination complète des locaux en deux étapes a été réalisée : aspiration des débris et de la poussière suivie d'un nettoyage humide avec un solvant industriel (Ledisolv[®]). Le système de ventilation a été démantelé pour être remplacé par un nouveau. Pour ce faire, les conduits ont été décrochés de la structure (plafond) par segment, coupés sur le sens de la longueur, nettoyés par aspiration et nettoyage humide, pliés et emballés pour être envoyés dans une entreprise effectuant le recyclage des métaux. Les résultats du suivi de la décontamination fournis par l'établissement seront discutés sommairement. Toutefois, l'évaluation des trois techniques de prélèvement de surface a été réalisée lors d'une visite avant le début des travaux.

4.3.1.4 Entreprise 4

Cette compagnie, similaire à l'entreprise 1, fabrique des bouteilles de plastique à partir de moules en alliage de CuBe. La problématique de cette entreprise consistait principalement en la présence de béryllium sur les moules à des concentrations supérieures à la valeur de référence et ce, même après un nettoyage humide avec un solvant. Deux de ces moules ont été transportés dans les laboratoires de l'IRSST afin de réaliser une évaluation de l'efficacité de différentes solutions nettoyantes.

4.3.1.5 Entreprise 5

L'efficacité des solutions nettoyantes a été également évaluée dans une aluminerie. Les expérimentations se sont déroulées dans le département du scellement des anodes où est effectué le nettoyage des mégots (anodes usées) qui consiste à enlever le bain électrolytique (contenant du béryllium) qui adhère à la surface des anodes durant l'électrolyse. L'intervention s'est déroulée pendant les activités normales du département.

4.3.1.6 Entreprise 6

L'entreprise 6 produit principalement des pièces de plastique injectées, destinées aux secteurs médical, informatique, etc. Elle fabrique ses moules, dont certains contiennent des insertions en CuBe. La visite a été effectuée après une activité de nettoyage et a permis d'évaluer les trois techniques de prélèvement de surface.

4.3.1.7 Entreprise 7

Cette entreprise est spécialisée dans la fabrication de moules (pour des pièces automobiles, bouteilles de plastique, etc.) par des procédés d'extrusion, intrusion, automoulage et électroérosion. Elle fabrique et répare des moules, dont certains contiennent des insertions de CuBe. La visite a été effectuée après une opération de nettoyage et a permis l'évaluation des trois techniques de prélèvement de surface.

4.3.2 Techniques d'échantillonnage

Lors des visites en entreprise, des prélèvements d'air ainsi que des prélèvements de surface ont été réalisés durant l'exécution des travaux de décontamination. Des échantillons de surface ont aussi été prélevés avant le début des travaux afin de déterminer la contamination initiale ainsi qu'après l'exécution des travaux pour vérifier l'efficacité de la décontamination.

4.3.2.1 Prélèvements d'air

Des prélèvements d'air ont été effectués dans la zone respiratoire des travailleurs durant les travaux de nettoyage. D'autres prélèvements en poste fixe, près de la zone de travail, permettaient d'évaluer l'étendue de la contamination dans l'air en fonction des méthodes de travail. Les prélèvements ont été effectués en conformité avec le « Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail » de l'IRSST (2005).

Les supports collecteurs utilisés lors des interventions sont présentés à la figure 7 : (A) cassette 37 mm avec une ouverture de 4 mm et une membrane en esters de cellulose mélangés (ECM) d'une porosité de $0,8 \mu\text{m}$ (poussières « totales »); (B) tête d'échantillonnage IOM[®] (Institute of Occupational Medicine) avec membrane de ECM, 25mm (poussières inhalables); (C) cassette ouverte 3 pièces 37 mm avec une membrane ECM, $0,8 \mu\text{m}$ combinée à un cyclone d'aluminium (poussières respirables); (D) impacteur en cascade Sierra[®] 8 étages (Andersen[®] modèle 298) avec substrats de 34 mm en ECM permettant 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).

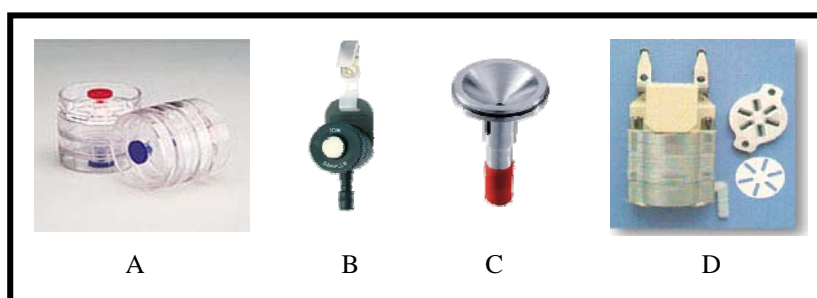


Figure 7 : Supports collecteurs : A – cassette d'échantillonnage, B - IOM[®], C - cyclone en aluminium, D - impacteur Sierra[®]

4.3.2.2 Prélèvements de surface

L'efficacité des techniques de nettoyage et de décontamination a été vérifiée par le biais de prélèvements de surface avec les lingettes humides (Ghost Wipe[®]) (IRSST, 2008).

4.4 Analyse des échantillons

Les filtres ECM ont subi une digestion acide afin de solubiliser les poussières et en déterminer leur concentration en béryllium. L'analyse du béryllium se fait à l'aide d'un plasma à induction avec couplage à un spectromètre de masse (ICP-MS) selon la méthode IRSST-359 (IRSST, 2008b). La valeur minimale rapportée (VMR) est de 0,0005 µg.

Les Ghost Wipes[®] subissent le même traitement et sont analysés de façon similaire aux filtres ECM pour leur contenu en béryllium, selon la méthode IRSST-359. La VMR est de 0,05 µg.

Pour le système utilisé pour l'aspiration (micro-vacuum), le tube de plastique servant à l'échantillonnage a été nettoyé avec de l'acide nitrique concentré. La solution résultante était ajoutée au liquide de digestion du filtre de la cassette correspondante pour s'assurer d'analyser l'ensemble des poussières collectées. Les analyses se font de la même façon que pour les filtres ECM.

5. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en trois sections : solutions nettoyantes (partie laboratoire et partie terrain), techniques de prélèvement de surface (partie laboratoire et partie terrain) et techniques de nettoyage et de décontamination (terrain).

5.1 Solutions nettoyantes

Les solutions nettoyantes ont d'abord été évaluées en laboratoire sur des surfaces de CuBe (moules et plaques) ainsi que dans des boîtes de Pétri enrichies de béryllium. La méthodologie a ensuite été appliquée en milieu de travail sur différents types de surface.

5.1.1 Évaluation sur les surfaces en alliage de cuivre-béryllium

5.1.1.1 Les moules

Les essais ont été réalisés sur deux moules (A et B). Des frottis de surface (F) ont été réalisés à l'aide des lingettes humides ainsi qu'avec les lingettes humides imbibées de la solution à l'étude pour réaliser le nettoyage (N).

La figure 8 présente les résultats pour le moule A :

- N1-N7 = frottis avec lingettes imbibées de solutions nettoyantes ;
- F1-F6 = frottis avec lingettes humides ;
- F7 = frottis après le nettoyage avec une brosse à dents ;
- F8 = frottis après rinçage à l'eau ;
- F9 = frottis après immersion complète du moule dans l'eau savonneuse.

La figure 9 présente les résultats pour le moule B :

- N1-N10 = frottis avec lingettes imbibées de solutions nettoyantes ;
- F1-F4 = frottis avec lingettes humides.

Les frottis ont été effectués sur une période de plusieurs semaines, la semaine 1 correspondant au début des manipulations.

Les résultats présentés sur ces deux figures démontrent que l'efficacité du produit Citranox[®] (solution acide) pour récupérer du béryllium sur la surface est largement supérieure aux autres produits testés (solutions neutre ou basiques). Pour les deux moules, les concentrations de béryllium sont généralement au-dessus de la valeur de référence, même lors du frottis avec lingette humide (F) réalisé après le nettoyage (contamination résiduelle) et ce, pour la majorité des solvants testés.

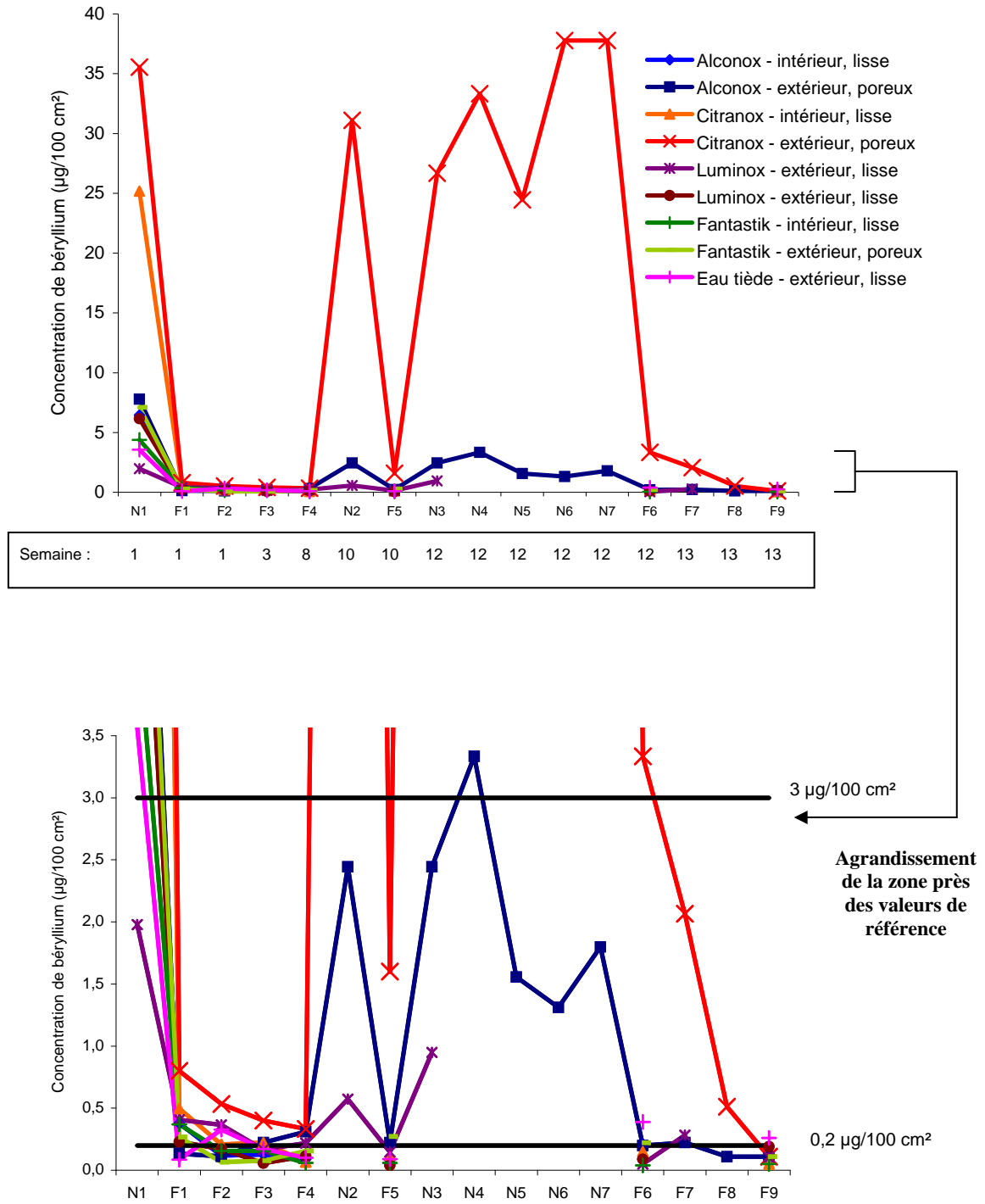


Figure 8 : Concentrations de béryllium sur les différentes surfaces du moule A

- F frottis
- N frottis imbibé de solution pour le nettoyage

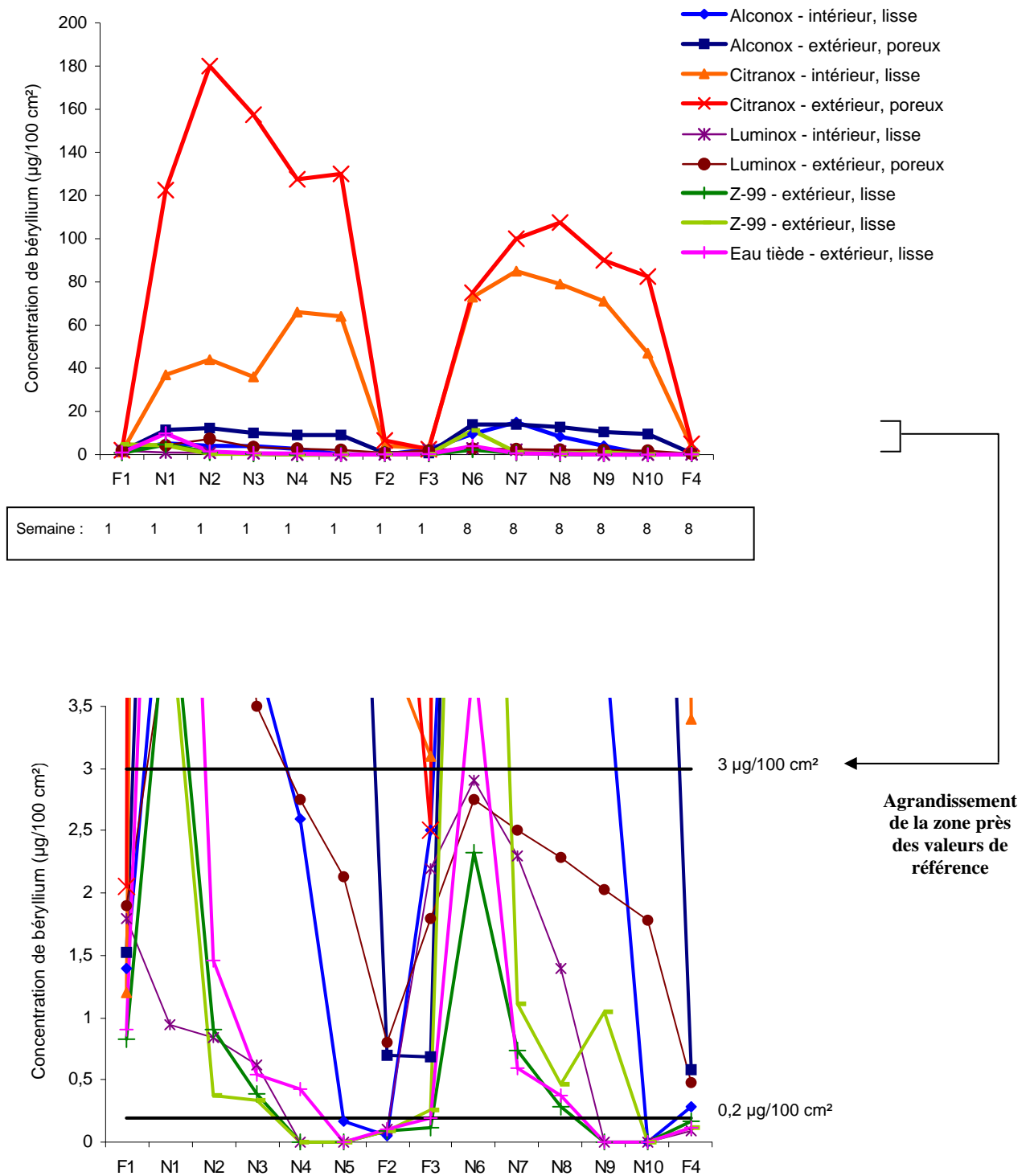


Figure 9 : Concentrations de béryllium sur les différentes surfaces du moule B

F frottis
N frottis imbibé de solution pour le nettoyage

Notons que les surfaces, intérieures et extérieures du moule, nettoyées avec la solution acide Citranox[®] ont retrouvé leur coloration cuivrée laissant supposer l'absence d'oxydation (figure 10). Cette observation est spécifique au produit Citranox[®]; les autres solutions à l'étude n'ont pas démontré une telle capacité.



Figure 10 : Nettoyage des surfaces (intérieures et extérieures du moule) avec la solution acide

5.1.1.2 Les plaques

Les résultats des tests avec les solutions réalisés sur les plaques de CuBe ont aussi démontré que la solution Citranox[®] est la plus efficace pour déloger le béryllium de la surface (figure 11). Pour chaque solution, les différents prélèvements (F et N) ont été réalisés successivement. Les manipulations ont été effectuées à deux reprises avec le produit Citranox[®] uniquement, sur la même surface, à 2 semaines d'intervalle. Notons que, comparativement aux résultats provenant des prélèvements sur les moules, les concentrations sont en-dessous de la valeur de référence pour tous les autres solvants.

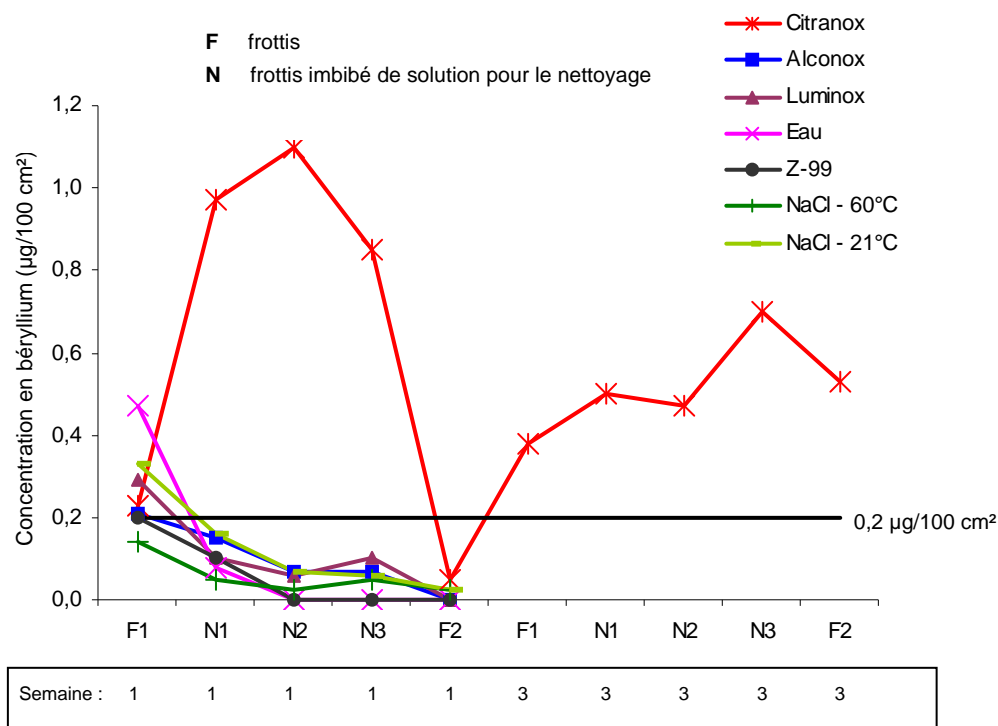


Figure 11 : Concentrations de béryllium sur les plaques de CuBe

5.1.2 Évaluation des solutions dans des boîtes de Pétri enrichies

Les valeurs cibles obtenues pour les deux solutions (acétate de Be et BeCl_2) et la suspension (BeO) suite à l'analyse par ICP-MS sont présentées au tableau 3. Compte tenu des difficultés liées à l'atteinte d'une valeur cible de $0,2 \mu\text{g}$ pour la suspension de BeO (composé insoluble), une concentration de près de $0,4 \mu\text{g}$ a été retenue.

Tableau 3 : Valeur cible de Be pour les solutions / suspension de composé de Be

Composés de béryllium	Préparation	Valeur cible (μg)
Acétate de béryllium	Solution diluée dans l'eau	0,203
BeCl_2	Solution diluée dans l'acide nitrique	0,204
BeO	Suspension dans l'acide nitrique	0,387

Le taux de récupération de béryllium était variable selon le solvant utilisé et selon le composé à l'étude (figure 12). Avec le produit Luminox[®], la récupération dans les boîtes de Pétri enrichies avec l'acétate de béryllium, a été supérieure à 100 %; ce qui est acceptable compte tenu de l'incertitude liée à la méthode d'analyse du béryllium (de l'ordre de 3 % avec les filtres ECM). Avec l'oxyde de béryllium, le taux de récupération a varié de 50 à 81 %. Ce résultat était attendu puisque le taux de récupération moyen pour la digestion acide du BeO

seul, tel que mesuré pour la validation de la méthode analytique IRSST 359, est de l'ordre de 80 %.

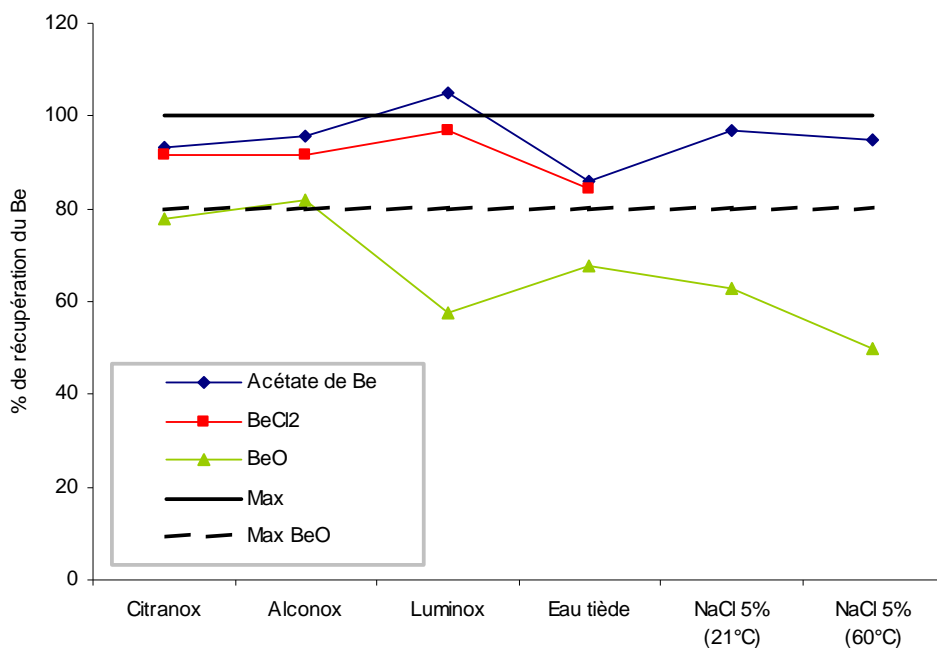


Figure 12 : Taux de récupération du béryllium dans les boîtes de Pétri

5.1.3 Évaluation des solutions sur le terrain

Les résultats des tests pour les solutions nettoyantes réalisés dans les trois entreprises sont présentés à l'annexe C. Six types de surface ont été échantillonnés : métal, métal peinturé, bois, Plexiglas[®], béton et béton peinturé. La concentration de béryllium a diminué après les étapes de nettoyage sur toutes les surfaces à l'exception du plancher de ciment 2, pour lequel les concentrations de béryllium avant nettoyage étaient moins élevées (F1 = 0,4; 0,65; 0,79; 0,31 µg/100 cm²) qu'après le nettoyage avec les solutions (F2 = 1,1; 2,3; 1,8; 0,41 µg/100 cm²).

5.2 Techniques de prélèvement de surface

Cette section présente les résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain pour les trois techniques de prélèvement de surface étudiées.

5.2.1 Valeur cible des préparations de composés de béryllium

Les valeurs cibles obtenues pour les deux solutions (acétate de Be et BeCl₂) et les deux suspensions (AlBeMet et BeO) suite à l'analyse par ICP-MS sont présentées au tableau 4. La valeur visée, lors de la préparation des solutions et des suspensions, était de 0,1 µg.

Tableau 4 : Valeur cible en Be des solutions ou suspensions préparées pour les composés de Be

Composés de béryllium	Préparation	Valeur cible (µg)
Acétate de béryllium	Solution diluée dans l'eau	0,1
BeCl ₂	Solution diluée dans l'eau	0,1
AlBeMet	Suspension dans isopropanol	0,033
BeO	Suspension dans isopropanol	0,09

En raison d'un faible résultat obtenu avec le composé de béryllium et aluminium (AlBeMet), une nouvelle suspension a été préparée dans les mêmes conditions et une quantité de 0,041 µg a été obtenue. La première suspension (résultat présenté dans le tableau 4) a été analysée de nouveau, après plusieurs semaines et une quantité de 0,037 µg a alors été retrouvée. Les résultats, quoique reproductibles, démontrent la difficulté d'obtenir une suspension de concentration précise pour ce composé.

5.2.2 Frottis avec les lingettes humides

Le tableau 5 présente la moyenne des taux de récupération calculée pour les trois prélèvements effectués dans les boîtes de Pétri avec la lingette humide (effectués par la même personne) selon la surface, le composé et la concentration de béryllium. Le taux de récupération du béryllium varie selon le type de surface, étant plus élevé pour les boîtes de Pétri en aluminium. Les coefficients de variation (CV) varient de 1,5 à 45,7 %. En général, l'acétate de béryllium est le composé qui a été le plus efficacement récupéré lors des prélèvements, tandis que le mélange AlBeMet est celui qui présente les taux de récupération les plus faibles et les coefficients de variation (CV) les plus élevés.

Tableau 5 : Moyenne des taux de récupération des prélèvements avec lingette humide (même opérateur)

Surface	µg de Be	Acétate de béryllium		BeCl ₂		AlBeMet		BeO	
		% Récupération	CV (%)	% Récupération	CV (%)	% Récupération	CV (%)	% Récupération	CV (%)
Plastique	0,1	73	6,2	73	7,9	52	45,7	81	7,9
	0,2	86	7,6	57	5,1	43	24	63	18,4
	0,4	73	12,4	48 68	7,9 6,4	49	16,3	67	4,2
Verre	0,4	74	5,1	60	26	74	29,1	71	2,2
Aluminium	0,4	96	1,5	97	1,5	45	5,6	79	7,3

L'évaluation inter-individuelle a été réalisée en utilisant les résultats de l'opérateur principal (opérateur 1) avec les résultats d'un opérateur variable (opérateur 2). Le tableau 6 présente la moyenne des taux de récupération des trois prélèvements avec la lingette humide pour les différentes surfaces et les composés de béryllium, en fonction de l'opérateur qui effectue le prélèvement. Les deux résultats présentant une différence statistiquement significative ont été repris par l'opérateur concerné pour obtenir un deuxième résultat, éliminant ainsi la différence statistique. Hormis ces deux résultats, le rapport entre le taux de récupération de l'opérateur 1 (Op1) et celui de l'opérateur 2 (Op2) oscille autour de 1.

Tableau 6 : Différence inter-individuelle présentée avec la moyenne des taux de récupération des prélèvements avec lingette humide pour les deux opérateurs

Surface	Opérateur	Acétate de béryllium		BeCl ₂		AlBeMet		BeO	
		Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)
Plastique	1	73	12,4	48 68	7,9 6,4	49	16,3	67	4,2
	2	82	8,8	78	7,4	52	32,2	62	6,8
Rapport (Op1 / Op2)		0,9		0,6 / 0,9		1,0		1,1	
Verre	1	74	5,1	60	26	74	29,1	71	2,2
	2	75	14,5	14 68	96,8 6,9	59	28,1	77	4,2
Rapport (Op1 / Op2)		1,0		4,3 / 0,9		1,3		0,9	
Aluminium	1	96	1,5	97	1,5	45	5,6	80	7,3
	2	96	1,5	97	1,5	46	19,2	56	13,2
Rapport (Op1 / Op2)		1,0		1,0		1,0		1,4	

5.2.3 Aspiration (micro-vacuum)

La moyenne des taux de récupération du béryllium avec la technique utilisant l'aspiration pour chaque composé et chaque concentration est présentée au tableau 7. Les prélèvements par aspiration ont été réalisés dans des boîtes de Pétri en plastique uniquement et par une seule personne. Le taux de récupération est faible pour les quatre composés de béryllium (entre 0,13 et 12,4 %) avec des CV variant de 18,7 à 125,8 %.

Tableau 7 : Moyenne des taux de récupération par aspiration dans les boîtes de Pétri

µg de Be	Acétate de béryllium		BeCl ₂		AlBeMet		BeO	
	Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)	Récupération (%)	CV (%)
0,1	1,9	125,8	2,1	53,7	4,8	75,9	2,5	31,2
0,2	4,5	78,6	3,0	83,0	3,9	72,2	1,5	37,1
0,4	0,13	48,1	3,0	65,4	12,4	125,4	1,8	18,7

5.2.4 ChemTest® (colorimétrie)

Les résultats avec les filtres ChemTest®, après une analyse effectuée conformément aux instructions du fabricant, sont présentés à la figure 13. Une faible coloration bleue est présente à partir de 0,1 µg de béryllium, malgré que le fabricant mentionnait plutôt une limite inférieure de 0,2 µg; la coloration s'accroît, lorsque la quantité de béryllium augmente pour trois des composés de béryllium étudiés. Notons que le test ne détecte pas la présence de l'oxyde de béryllium, dans les conditions d'utilisation.

Le temps d'attente entre l'utilisation des trois solutions de développement pour le séchage des filtres était plus long que la durée indiquée par le fabricant (plus de 3 heures plutôt que 2 heures) et ce, même si les manipulations étaient réalisées dans un endroit favorisant un séchage rapide (hotte de laboratoire).

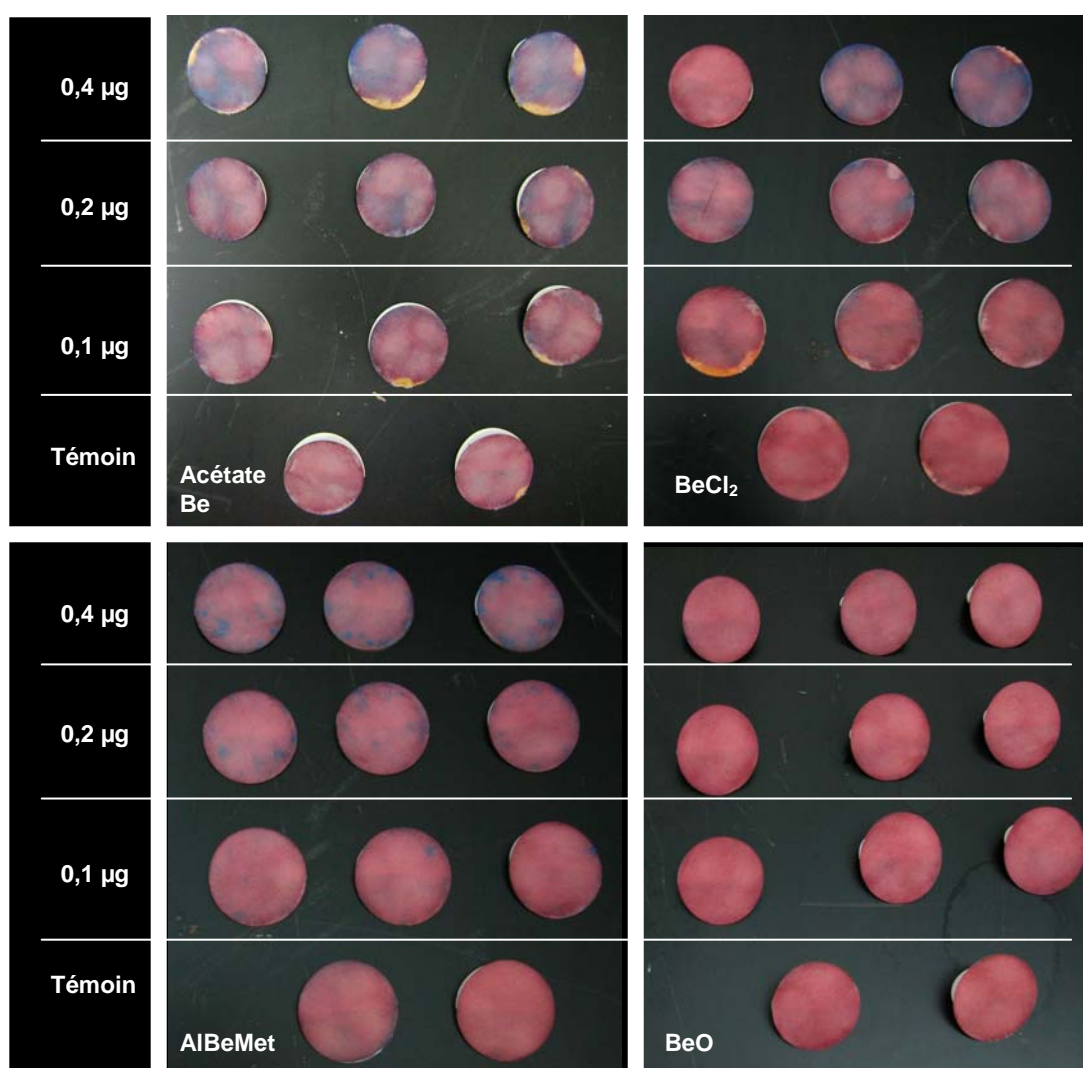


Figure 13 : Prélèvements avec les filtres ChemTest® après analyse

5.2.5 Évaluation des techniques de prélèvement sur le terrain

Les résultats des trois techniques de prélèvement de surface dans les trois entreprises sont présentés à l'annexe D. Les prélèvements réalisés avec les lingettes humides ont donné un meilleur taux de récupération du Be comparativement aux prélèvements par aspiration, tout comme les résultats en laboratoire. Cependant, le rapport des concentrations de béryllium entre ces deux techniques de prélèvement étaient près de 1 sur les surfaces où une grande quantité de poussière était déposée.

La technique colorimétrique avec le ChemTest[®] n'a pas démontré une bonne efficacité sur les différentes surfaces échantillonnées sur le terrain. Une grande quantité de poussières sur les surfaces échantillonnées ou la présence d'huile bloquent la surface du filtre et empêchent sa coloration. Les résultats positifs (coloration bleue) observés avec le ChemTest[®] ne sont pas toujours corroborés par les deux autres techniques (par exemple, annexe D, tableau D2, entreprise 6, numéros 4 et 6).

5.3 Techniques de nettoyage et de décontamination

Les concentrations de Be obtenues à partir des prélèvements d'air (s'il y a lieu) et de surface sont présentées pour les entreprises visitées dans le cadre de travaux de nettoyage.

5.3.1 Entreprise 1

5.3.1.1 Contamination de surface

La présence de béryllium dans l'atelier d'usinage, où les moules de CuBe étaient confectionnés, réparés et entreposés, a été observée lors d'une visite préliminaire par le biais de prélèvements de surface sur les murs, les outils, les moules et les machines. La concentration maximale retrouvée était de 463 µg/100 cm² sur le panneau protecteur d'un tour utilisé pour l'usinage des moules (tableau 8).

Lors de la décontamination dans l'atelier, les résultats aux différentes étapes de la réalisation des travaux démontrent l'efficacité des méthodes utilisées. En effet, après la dernière étape de décontamination, les résultats étaient en-dessous de la VMR sur les différentes surfaces.

Tableau 8 : Concentrations de Be des prélèvements de surface lors des travaux (entreprise 1)

Période	Nombre d'échantillons	Moyenne (µg Be/100 cm ²)	Médiane (µg Be/100 cm ²)	(min. - max.) (µg Be/100 cm ²)
Visite préliminaire	5	100,3	3,3	(0,57 - 463)
Avant aspiration	6	5,2	1	(0,34 - 18)
Après aspiration	7	1,8	0,24	(0,11 - 9,9)
Après nettoyage humide	4	< VMR	< VMR	Tous < VMR

VMR : valeur minimale rapportée (0,05 µg)

5.3.1.2 Prélèvements d'air

Les prélèvements d'air ont été réalisés en zone respiratoire des travailleurs durant l'aspiration des débris et de la poussière à l'aide de différents capteurs (tableau 9). Les concentrations de béryllium étaient toutes inférieures à 0,15 µg/m³ (VEMP applicable pour les poussières totales).

Tableau 9 : Prélèvements d'air en zone respiratoire des travailleurs durant les travaux (entreprise 1)

Fraction	Concentration	
	poussières (mg/m ³)	béryllium (µg/m ³)
Respirable	<VMR	<VMR
	0,27	0,0051
« Totale »	<VMR	0,0073
	<VMR	0,0020
Inhalable	1,3	0,13
	0,42	0,0065
Inhalable et respirable (Sierra [®])	<VMR	<VMR
	1,2	0,014

VMR : Valeur minimale rapportée (0,0005 µg/échantillon)

5.3.2 Entreprise 2

5.3.2.1 Contamination de surface

Pour cette entreprise, certaines surfaces avaient des concentrations de béryllium supérieures à la valeur seuil de 0,2 µg/100 cm², même après l'aspiration suivie d'un nettoyage humide avec solvant (tableau 10). L'application d'un scellant sur les surfaces du plancher de béton a finalement permis de diminuer la contamination accessible de béryllium sous la valeur de référence.

Tableau 10 : Concentrations de Be des prélèvements de surface lors des travaux (entreprise 2)

Période	Nombre d'échantillons	Moyenne (µg Be/100 cm ²)	Médiane (µg Be/100 cm ²)	(min. - max.) (µg Be/100 cm ²)
Avant aspiration	8	8,1	7,3	(1,4 - 16)
Après aspiration	8	2,8	2,1	(< VMR - 7,4)
Après nettoyage humide	8	0,22	0,2	(< VMR - 0,71)
Plusieurs jours après	21	0,17	0,08	(< VMR - 1,5)
Après scellant	2	< VMR	---	Tous < VMR

VMR : Valeur minimale rapportée (0,05 µg)

5.3.2.2 Prélèvement d'air

Les prélèvements en poste ambiant étaient localisés près du travailleur (généralement attachés à la nacelle, figure 14) et étaient effectués lors de l'aspiration des poussières et débris ainsi que lors du nettoyage humide. Les concentrations de béryllium de ces prélèvements se situaient toutes sous la valeur limite de $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figure 14 : Poste ambiant avec collecteurs attachés à la nacelle

En zone respiratoire, les prélèvements ont été réalisés uniquement durant l'aspiration des poussières et débris. Le tableau 11 présente les résultats, dont certaines concentrations dépassent la VEMP. Notons que les prélèvements pour les poussières inhalables (IOM[®]) et pour les poussières « totales » (cassette 37 mm) n'ont pas été réalisés durant la même journée.

Tableau 11 : Prélèvements d'air en zone respiratoire durant les travaux de nettoyage par aspiration (entreprise 2)

Collecteur	Nombre d'échantillons	Moyenne ($\mu\text{g Be}/\text{m}^3$)	Médiane ($\mu\text{g Be}/\text{m}^3$)	(min. - max.) ($\mu\text{g Be}/\text{m}^3$)
IOM [®]	4	0,23	0,22	(0,11 - 0,39)
Cassette 37 mm	6	0,45	0,13	(0,024 - 1,7)

5.3.3 Entreprise 3

L'établissement a effectué lui-même des prélèvements avec le frottis et la technique par aspiration (micro-vacuum) à la fin des travaux de décontamination sur différents types de surface (ciment peinturé, bois, métal, tissus). Les résultats, généralement inférieurs à $0,2 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$, ont montré que les techniques de nettoyage utilisées étaient efficaces. Les

prélèvements de surface montrant des résultats supérieurs à la valeur de référence ont été expliqués par un oubli de nettoyage ou à des surfaces plus difficiles à nettoyer, comme le tissu recouvrant les chaises.

5.3.4 *Entreprise 4*

Des prélèvements de surface ont été effectués sur deux moules (1 et 2), semblables à celui de la figure 2, avant et après leur nettoyage, afin de vérifier la variation de la contamination des surfaces (tableau 12). Les résultats démontrent que la valeur de 0,2 µg/100 cm² est dépassée sur les surfaces de CuBe et ce, même après le nettoyage humide avec solvant. La présence de béryllium sur la surface en aluminium, en concentrations plus élevées après le nettoyage qu'avant, laisse supposer une migration des particules de béryllium.

Tableau 12 : Concentration de béryllium des prélèvements avec lingettes humides avant et après le nettoyage de deux moules en industrie

Moule	Surface	Concentration de béryllium (µg/100 cm ²)		
		Prélèvement en février	Prélèvement en juin (juste avant le nettoyage)	Prélèvement en juin (juste après le nettoyage)
1	CuBe	3,6	3,2	2,0
	Al	NA	< VMR	0,10
2	CuBe	0,70	3,2	1,4
	Al	NA	0,20	0,24

NA : Non applicable

VMR : Valeur minimale rapportée (0,05 µg)

6. DISCUSSION

La discussion est présentée séparément pour chacune des études réalisées dans le cadre de ce projet, soit l'évaluation de solutions nettoyantes (industrielles et commerciales), l'évaluation de trois techniques de prélèvement de surface et l'évaluation des techniques de nettoyage et de décontamination.

6.1 Solutions nettoyantes

6.1.1 Surface en CuBe

L'objectif de l'étude portant sur les solutions nettoyantes consistait principalement à répondre aux deux questions suivantes :

- Est-il possible de diminuer la concentration de béryllium libre à la surface d'une pièce métallique constituée d'un alliage en cuivre-béryllium (2 % Be), à un niveau inférieur au critère de 0,2 µg/100 cm² ?
- Y a-t-il des solutions nettoyantes plus efficaces pour déloger le béryllium de la surface de ces pièces de métal ?

Le produit Citranox[®], avec son caractère acide, a démontré qu'il était le plus efficace pour récupérer du béryllium de la surface des moules et des plaques. Par contre, la contamination résiduelle, suite au nettoyage avec ce produit, était plus élevée que lors de l'utilisation des autres produits et généralement bien au-delà de la valeur de référence de 0,2 µg/100 cm² (pour les moules et les plaques). Ainsi, même si le produit acide permet un meilleur nettoyage du béryllium de la surface, il n'en reste pas moins que le béryllium est toujours présent à la surface.

Nakao *et al.* (1979) ont démontré que de l'oxyde de béryllium (BeO) à 10 % (p/p) ou plus était formé à la surface d'un métal fait d'alliage de CuBe (2 % Be), en formant de fines couches relativement homogènes. La concentration de Be était de 0,2 % (p/p) en surface et de 1,9 % à une profondeur de 300 nm. Dans une autre étude (*Belkiat, 1998*), la formation d'une couche mince de BeO en surface a également été observée lorsqu'une pièce de métal en alliage de CuBe (4 % Be) était chauffée. Ce qui laisse supposer une ségrégation de Be vers la surface et son oxydation.

Ainsi, lorsque la surface est nettoyée avec le Citranox[®], le caractère acide de ce dernier permet l'élimination des couches formées de BeO, comme le démontre la figure 12. Après le nettoyage, de l'oxyde de béryllium en fines couches se formerait de nouveau à la surface. L'utilisation d'un produit acide, tel le Citranox[®], pour le nettoyage des pièces de CuBe, n'est donc pas recommandée, à petite comme à grande échelle, considérant la quantité de béryllium généré durant le processus, qui pourrait augmenter le risque d'exposition cutanée.

De plus, les observations rapportées dans les deux études citées pourraient expliquer la différence observée dans la quantité de béryllium prélevée par frottis entre les plaques neuves (pas d'oxydation apparente) et les moules (oxydation apparente). Ainsi, une surface oxydée serait plus susceptible de libérer du béryllium (avec un frottement). Il semble donc difficile de maintenir la contamination à un niveau inférieur à 0,2 µg/100 cm², sur la surface d'un matériau en alliage de CuBe.

Dans une zone où le béryllium continuera d'être utilisé, l'entreprise doit assurer un suivi régulier du niveau de contamination et établir un programme d'entretien ménager, associés à des mesures de maîtrise de l'exposition et de port d'équipements de protection pour les travailleurs, tels que :

- entreposage des pièces contenant du béryllium dans un endroit fermé, avec une affiche à l'entrée indiquant la présence de béryllium dans le local et les équipements de protection requis ;
- emballage de la pièce lors des déplacements ;
- enceinte fermée entourant la pièce lors de son utilisation dans un procédé ;
- étiquette installée sur la pièce (ou son emballage) mentionnant les risques d'exposition et les équipements de protection requis ;
- protection cutanée lors de la manipulation de ces pièces (gants, manches longues, ...) ;
- protection respiratoire recommandée par le Guide de protection respiratoire (CSST, 2002) ;
- formation et information des travailleurs.

Afin de limiter l'accumulation des poussières et leur propagation vers d'autres zones, le niveau de contamination des surfaces doit être inférieur à $3,0 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$. Pour le nettoyage des pièces ou des zones contaminées, l'utilisation d'un produit neutre (Luminox[®]) ou basique (Alconox[®], Fantastik[®] et Z-99[®]) serait alors suggérée étant donné leur caractère moins agressif. Ces produits ont démontré leur capacité à récupérer du béryllium de la surface en laissant une contamination résiduelle généralement en-dessous de $3,0 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$.

6.1.2 Taux de récupération

Les tests réalisés dans les boîtes de Pétri ont permis d'évaluer la capacité des lingettes humides, trempées dans différentes solutions nettoyantes, de récupérer le béryllium (sous la forme de trois composés différents) sur une surface lisse (polystyrène).

Dans l'évaluation de la méthode analytique IRSST 359, une solubilisation incomplète de l'oxyde de béryllium (85 %) a été mise en évidence (IRSST, 2008b). Ainsi, le taux de récupération obtenue avec le BeO pour cette expérimentation, se comparent bien aux résultats obtenus avec l'acétate de béryllium et le chlorure de béryllium.

En ce qui concerne la récupération du béryllium sur la surface d'un matériau ne contenant pas de béryllium, l'efficacité des différentes solutions était semblable comparativement aux essais réalisés sur les surfaces de CuBe où la solution acide récupérait beaucoup plus de béryllium que les autres solutions. Ceci a été démontré tant lors des essais dans les boîtes de Pétri que sur les différentes surfaces évaluées en entreprise.

6.1.3 Évaluation sur le terrain

En milieu de travail, le plancher de ciment 2 (entreprise 2) était la seule surface où les concentrations de Be après trois nettoyages successifs étaient plus élevées qu'avant le nettoyage. La porosité du matériel ainsi que la friabilité et la dégradation de la surface pourraient être des facteurs importants dans l'érosion du béryllium vers la surface ; le bois n'a

pas montré le même comportement. Ces caractéristiques rendent la surface difficile à échantillonner avec la méthode du frottis, ce qui pourrait avoir affecté la fiabilité des résultats. Ainsi, le nettoyage aurait eu pour effet d'augmenter la concentration de béryllium en surface.

Cet effet a déjà été observé pour des surfaces contaminées avec le plomb. C'est pourquoi une seconde aspiration serait plus efficace sur les surfaces difficiles à décontaminer et permettrait de récupérer les particules de plomb libérées lors du nettoyage humide (*Grinshpun, 2002 ; Yiin, 2004*). Un cycle de nettoyage en trois étapes est proposé par le US HUD (1995) : (1) aspiration des débris et de la poussière, (2) nettoyage humide avec détergent et (3) aspiration de la poussière.

6.2 Techniques de prélèvement de surface

6.2.1 Frottis de surface

La méthode d'échantillonnage des surfaces à l'aide de frottis avec la lingette humide a déjà été étudiée pour l'évaluation de la contamination au plomb (*Lanphear, 1995 ; Reynolds, 1997*) et aussi pour la contamination au béryllium (*Dufay, 2006 ; Ashley, 2005*).

L'étude de Dufay a été réalisée dans le but de comparer les méthodes de prélèvements humides et secs en fonction de différents milieux collecteurs dont le Ghost Wipe[®], pour des concentrations de béryllium soluble (0,003 à 3 µg), sur une surface de verre non poreuse. Les résultats indiquent une grande différence entre les différents types de milieux collecteurs. Le Ghost Wipe[®] a révélé un taux moyen de récupération de 85,9 % (CV de 7,1 %).

Les résultats de la présente étude avec l'acétate de béryllium (composé soluble) ont montré des taux de récupération avec le Ghost Wipes[®] de l'ordre de 73 % (CV de 12,4 %) à 96 % (CV de 1,5 %) pour les trois types de surface (plastique, verre et aluminium). Ces résultats sont donc comparables à ceux de Dufay. Par contre, avec le chlorure de béryllium, BeCl₂, (autre composé soluble), les résultats sont plus variables avec un taux de récupération variant de 48 à 97 % (CV : 1,5 à 26 %).

Les taux de récupération observés avec le composé d'aluminium et de béryllium (AlBeMet) sont plus faibles (entre 43 et 74 %) avec des CV plus élevés que les autres composés, soit entre 5,6 % (surface en aluminium) et 45,7 % (surface en plastique). Pour calculer la concentration de Be en suspension dans l'isopropanol, les rapports de concentration soumis par le fournisseur du produit (62 % de Be et 38 % d'aluminium) ont été utilisés sans aucune autre certification. Il est donc difficile d'affirmer que la quantité du produit prélevée de la bouteille pour effectuer la pesée soit représentative de l'ensemble du mélange. Ainsi, l'hétérogénéité du produit utilisé ou l'hétérogénéité de la suspension préparée pour les essais en laboratoire pourrait expliquer l'obtention de tels résultats.

Les prélèvements effectués dans les boîtes de Pétri enrichies de BeO ont montré des taux de récupération variant de 63 à 81 % (CV de 7,9 à 18,4 %), comparables à ceux observés avec des composés solubles (acétate de Be et BeCl₂). Notons toutefois la sous-estimation possible de béryllium dans ce composé, en raison de la difficulté à le solubiliser complètement dans ces conditions d'analyse.

Les essais réalisés sur la surface en aluminium, lisse, ont montré les meilleurs taux de récupération, à l'exception du composé AlBeMet, avec des CV de l'ordre de 1,5 à 13,2 %, comparativement aux autres surfaces.

Des études publiées sur l'évaluation de la technique de prélèvement de surface utilisant la lingette humide ont également démontré des taux de récupération inférieurs à 100 %. (*Dufay, 2006; Lichtenwalner, 1992 ; Reynolds, 1997*). Ces taux de récupération peuvent toutefois être des indicateurs de l'efficacité des prélèvements, plus particulièrement avec le Ghost Wipe®.

Pour l'évaluation de la variation inter-individuelle, deux taux moyens de récupération ont montré une différence statistiquement significative entre les deux opérateurs (intervalle de confiance à 95 % et p-value inférieur à 0,05). Ces résultats ont été repris par l'opérateur concerné éliminant ainsi cette différence. Cela démontre qu'il peut y avoir une différence intra-individuelle et que le frottis de surface reste une technique de prélèvement où le facteur humain a une influence sur le résultat. Les rapports entre le taux de récupération moyen de l'opérateur 1 et de l'opérateur 2 sont généralement près de 1, démontrant une bonne reproductibilité de la méthode. Par contre, il faut considérer que les deux opérateurs proviennent du même laboratoire et ont eu une formation similaire. Les résultats pourraient être bien différents s'ils provenaient de deux laboratoires distincts (variation inter-laboratoires).

6.2.2 Aspiration (micro-vacuum)

Certaines surfaces sont plus difficiles à évaluer à l'aide de frottis de surface, d'où l'intérêt d'utiliser la technique de prélèvement par aspiration. Cette technique a surtout été étudiée lors de son utilisation sur les tapis de résidences contaminées au plomb (*Bai, 2003 ; Reynolds, 1997 ; Farfel, 1994 ; Lanphear, 1995*). Creek discute de la possibilité d'utiliser la technique du « micro-vacuum » pour l'échantillonnage de surface des particules de Be et conclut que la méthode, telle que décrite dans ASTM 7144, devrait être améliorée afin d'obtenir une efficacité de récupération accrue (*Creek, 2006*). Pour la présente étude, le débit de la pompe a été modifié à 16 L/min (au lieu de 2,5 L/min), tel que dans les études sur le plomb réalisées par le U.S. Department of Housing and Urban Development (*US Department of HUD, 1995*) et celle de Farfel *et al.* (1994).

Les résultats obtenus en laboratoire présentent des taux de récupération très faibles (entre 0,13 et 12 %) et des CV élevés (entre 18,7 et 125,8 %). Cela serait attribuable à la méthodologie appliquée. En effet, les particules de béryllium sont d'abord solubilisées ou mises en suspension dans un liquide pour ensuite revenir sous forme solide suite à l'évaporation du liquide. La morphologie et l'adhésion des particules à la surface seraient alors différentes que s'il s'agissait de particules déposées, comme c'est généralement le cas dans les entreprises.

6.2.3 ChemTest®

La fiabilité de la technique semi-quantitative de prélèvement de surface utilisant la colorimétrie (ChemTest®) a été vérifiée en laboratoire avec quatre composés de béryllium. Les tests sur les deux composés solubles (acétate de Be et BeCl₂) ont répondu positivement. De plus, une coloration bleue a été observée à partir d'une concentration de 0,1 µg de Be, au lieu de 0,2 µg, comme indiqué par le fournisseur. Ainsi, dès l'apparition d'une faible coloration bleue, qui indiquerait une concentration près de la valeur de référence, il serait

recommandé de faire un frottis de surface avec lingette humide afin de confirmer la présence de Be.

Dans le cas du composé d'aluminium et de béryllium (AlBeMet), le ChemTest[®] a réagi de façon similaire aux composés solubles, sauf que la coloration bleue est apparue sous forme de taches distinctes. Ceci pourrait être attribuable à l'insolubilité de AlBeMet et à l'hétérogénéité du dépôt dans la boîte de Pétri.

Selon nos résultats, la technique d'échantillonnage et d'analyse du ChemTest[®], réalisée selon les indications du fournisseur, ne réagit pas à la présence de l'oxyde de béryllium.

Une étude de Taylor (2002) discute de la validation de la détection du béryllium par colorimétrie utilisant une méthode similaire au ChemTest[®]. Les auteurs expliquent les difficultés rencontrées pour la solubilisation du BeO. Ils concluent que l'utilisation d'une solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) 10 %, serait adéquate pour la validation de la méthode avec le BeO, lorsque que le filtre et la surface sont en contact pour une période de 15 minutes. La solution permettant la solubilisation, pour le ChemTest[®], est effectivement du H₂SO₄ à 10 %, mais il n'est pas mentionné dans le manuel d'utilisation de privilégier un contact de 15 minutes avec la surface. D'autres essais pourraient être effectués afin de vérifier si un contact plus long serait la solution au problème.

Tekleab *et al* (2006) de la compagnie Microteq (fournisseur du ChemTest[®]) ont publié un article mentionnant qu'il n'y avait pas d'interférence avec leur méthode de prélèvement et d'analyse par colorimétrie pour la quantification du béryllium. Le rapport de validation fourni sur le site internet de la compagnie ne fait aucune mention quant à la difficulté de détecter le BeO.

La non-disponibilité d'un matériel de référence, qui pourrait permettre une évaluation du protocole de digestion et d'extraction avec le BeO, est discutée par la communauté scientifique (Brisson, 2006). Un tel matériel permettrait de valider les différentes méthodes d'analyse utilisées dans la détermination du béryllium.

L'achat de l'ensemble ChemTest[®] pour la détermination de béryllium revient à 350\$ pour 20 filtres (17,50\$ le filtre) et requiert un délai d'obtention des résultats d'environ 3 heures. Une analyse d'une lingette humide (Ghost Wipe[®]) réalisée en laboratoire coûte environ 50\$ avec un délai pouvant atteindre quelques jours.

La fiabilité du ChemTest[®] reste à être déterminée, surtout pour le BeO. L'absence de coloration n'indique donc pas que la concentration de Be est inférieure à 0,2 µg. La présence de BeO doit être confirmée par une analyse en laboratoire à moins que la composition précise du composé ne soit connue. De plus, le béryllium élémentaire qui peut s'oxyder en BeO au contact avec l'air, peut être présent dans plusieurs environnements de travail.

6.2.4 Évaluation sur le terrain

L'étude en laboratoire comportait certaines limitations comparativement à la réalité en entreprise : il ne s'agissait pas de poussière déposée, la surface était lisse et homogène, la superficie de la surface était limitée, le béryllium était le seul contaminant présent, etc. Des essais avec les trois méthodes d'échantillonnage de surface ont donc été effectués sur le terrain. En général, les résultats des prélèvements réalisés dans les entreprises (3, 6 et 7)

confirment ce qui a été observé en laboratoire, soit une meilleure récupération du béryllium avec les lingettes humides qu'avec la technique d'aspiration. Par contre, le rapport entre la concentration obtenue pour les frottis et pour l'aspiration est près de 1 lorsqu'il y a présence de beaucoup de poussières. La surface (lisse ou poreuse) ainsi que sa condition (état de la peinture, présence d'huile, empoussièrement, ...) expliqueraient la différence de concentrations de béryllium obtenue avec les deux types de prélèvement.

Nos résultats vont dans le même sens que ce qui a été observé dans d'autres études (*Farfel, 1994 ; Reynolds, 1997 ; Ashley, 2007*). Notons que la technique d'aspiration de type « micro-vacuum » a surtout été utilisée dans l'estimation de la contamination sur les tapis (*Reynolds, 1997 ; Bai, 2003*). Les techniques d'aspiration devraient être standardisées afin d'améliorer leur fiabilité et leur précision, et peuvent constituer une alternative de choix lorsque le frottis s'avère impraticable (*Ashley, 2005 ; Ashley, 2007 ; Farfel, 1994 ; Byrne, 2000*).

La technique colorimétrique avec le ChemTest[®] n'a pas démontré d'aussi bons résultats que les essais en laboratoire. En effet, une grande quantité de poussières sur les surfaces échantillonnées ou la présence d'huile sur la surface du filtre modifieraient la complétion des différentes réactions chimiques permettant l'obtention de la coloration du filtre. Finalement, la fiabilité des résultats avec la technique du ChemTest[®] est affectée par la condition de la surface. Le ChemTest[®] devrait donc être utilisé essentiellement dans les zones suspectées « propres » pour confirmer l'absence de Be.

6.3 Techniques de nettoyage et de décontamination

6.3.1 Efficacité des techniques de nettoyage

La procédure de nettoyage, généralement utilisée lors de décontamination, consiste en une aspiration des débris et de la poussière suivie d'un nettoyage humide avec ajout de détergent. Pour l'entreprise 1, ce cycle de nettoyage en deux étapes a permis une décontamination efficace des lieux (concentrations de Be inférieures à 0,2 µg/100 cm²) (tableau 8). Notons que les quatre prélèvements réalisés après le nettoyage humide n'ont pas été nécessairement effectués sur les surfaces qui présentaient une contamination notable à l'étape précédente (après l'aspiration).

L'entreprise 2, un endroit beaucoup plus vaste, présentait une contamination au béryllium à plus grande échelle. Les travaux de décontamination ont commencé avec le nettoyage et le déplacement des équipements et des machines vers un autre local. L'aspiration des débris et de la poussière a ensuite été effectuée sur les surfaces horizontales, suivie d'un nettoyage humide avec détergent à l'aide de jets à haute pression. Les prélèvements effectués après le nettoyage humide ont donné des concentrations variant de < VMR à 0,71 µg/100 cm² et jusqu'à 1,5 µg/100 cm² quelques jours après le nettoyage (tableau 10). Certains des résultats supérieurs à 0,2 µg/100 cm² proviennent de prélèvements effectués sur des surfaces verticales comme les murs. Nous pouvons supposer que dans ce cas précis, le nettoyage humide avec jets à haute pression sur une surface avec dépôt important de poussière, sans être précédé d'une aspiration, n'a pas été efficace. Pour le plancher de ciment 2, friable et abîmé, l'atteinte d'une concentration de béryllium inférieure à 0,2 µg/100 cm² a été ardue. En effet, même après la reprise du cycle de nettoyage, les concentrations étaient toujours supérieures à 0,2 µg/100 cm². L'application d'un scellant a été la solution retenue par l'entreprise pour confiner la contamination. Les résultats de frottis réalisés après l'application de cette barrière démontrent bien que la contamination n'est plus présente en surface. Il faudra cependant

suivre la dégradation du scellant pour s'assurer de l'efficacité continue de cette barrière. De plus, si des travaux demandant une modification de la structure sont entamés, les travailleurs devront être informés de la présence de cette contamination dans le matériau afin d'appliquer des mesures de prévention adéquates.

À l'entreprise 3, les méthodes de nettoyage utilisées ont été efficaces sur tous les types de surface, à l'exception des surfaces poreuses, qui ont nécessité un deuxième cycle de nettoyage, selon l'entrepreneur responsable de la décontamination.

Selon le rapport publié sur l'Opération béryllium dans les établissements du secteur de l'environnement, les entreprises utilisent généralement l'aspiration ou le nettoyage humide (CSST, 2006). De plus, il semble que le jet d'air soit encore utilisé pour l'entretien périodique, bien qu'il soit reconnu que cette pratique ne fasse que déplacer la contamination.

Finalement, la procédure à utiliser pour la décontamination peut varier selon le type de surface à nettoyer. En effet, un deuxième cycle de nettoyage est recommandé lorsque la contamination de surface reste supérieure à $0,2 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ après le premier cycle. Dans la problématique du plomb, les spécialistes suggèrent une deuxième aspiration lorsque la surface est difficile à décontaminer (Yiin, 2004; US HUD, 1995) et un deuxième nettoyage humide pour les surfaces poreuses comme le bois (Grinshpun, 2002).

6.3.2 L'exposition des travailleurs au béryllium

L'exposition au béryllium a été vérifiée par des prélèvements d'air en zone respiratoire des travailleurs uniquement lors de l'aspiration des débris et des poussières dans deux entreprises. Dans l'entreprise 1, tous les résultats étaient inférieurs à $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tandis que dans l'entreprise 2, chantier de plus grande envergure où la contamination était plus importante, les concentrations moyennes en poussières totales étaient de $0,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et de $0,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en poussières inhalables. Par contre, les échantillons prélevés en poste fixe se sont tous avérés inférieurs à la VEMP. Malgré le faible nombre d'échantillons, les résultats montrent que l'exposition peut varier selon les étapes de décontamination, les techniques de travail, la surface à décontaminer et la contamination initiale de surface.

Plusieurs études mentionnent que des travailleurs de l'entretien ou de la décontamination dans des lieux avec présence de Be sont atteints de la béryllose ou sont sensibilisés (Kreiss, 1997; Henneberger, 2001; Stange, 2001; Deubner, 2001; Kelleher, 2001; Madl, 2007). D'où la nécessité pour ces travailleurs de porter des équipements de protection individuels (cutanée et respiratoire). D'autres mesures de préventions sont également requises afin d'éviter la propagation des poussières vers l'extérieur ou la contamination de zones connexes. Ces mesures pourraient consister en un vestiaire double pour les travailleurs et des zones à décontaminer cloisonnées et sous pression négative.

7. CONCLUSION

Les essais de récupération en laboratoire ainsi que les essais de décontamination, en laboratoire et sur le terrain, montrent que la surface sur laquelle sont déposées les poussières de béryllium, le composé de béryllium, la solution nettoyante, la technique de prélèvement et l'opérateur sont des déterminants importants dans l'obtention d'un niveau de contamination de surface inférieure aux valeurs de référence.

Les outils et équipements en alliage de Be devront être traités comme étant des sources potentielles d'exposition cutanée et leur utilisation devrait être encadrée par des mesures de prévention adéquates. Une pièce contenant du béryllium, dont la surface a été décontaminée, conserverait toujours son potentiel de libération de Be. Ainsi, suite à un nettoyage avec un détergent acide, tel le Citranox[®], la surface subit un traitement chimique (oxydation) et de fines couches de BeO s'y forment à nouveau. L'utilisation d'un détergent acide n'est donc pas recommandée, à petite comme à grande échelle, considérant la quantité de béryllium généré durant le processus, qui pourrait augmenter le risque d'exposition cutanée.

Malgré sa variabilité intra et inter-individuelle, la méthode de prélèvement par frottis avec les lingettes humides demeure la technique la plus adéquate pour l'estimation de la contamination de surface. L'utilisation de l'aspiration (micro-vacuum) est envisageable sur les surfaces poreuses où la technique de frottis n'est pas appropriée. Par contre, la méthode colorimétrique (ChemTest[®]) devra être utilisée avec beaucoup de prudence. À notre avis, d'autres études en laboratoire ainsi que sur le terrain doivent être effectuées afin de valider les résultats de cette technique.

Le cycle de nettoyage combinant les deux méthodes (aspiration suivie d'un nettoyage humide avec détergent) est une procédure efficace sur les surfaces relativement lisses et homogènes. Après le cycle de nettoyage, le prélèvement d'échantillons de surface sur tous les types de surface est essentiel afin de vérifier l'efficacité de cette procédure. Un autre cycle de nettoyage peut s'avérer nécessaire pour certaines surfaces plus poreuses ou endommagées. L'application d'un scellant doit être envisagée uniquement lorsque le nettoyage s'avère inefficace et doit être accompagnée d'un suivi de son efficacité dans le temps.

8. RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats de la présente étude, les recommandations seraient à l'effet de :

- Combiner les deux méthodes de nettoyage des surfaces : aspiration (filtres HEPA) suivie d'un nettoyage humide ;
- Faire un deuxième cycle de nettoyage (aspiration et nettoyage humide) lorsque la contamination est $> 0,2 \mu\text{g}/100 \text{ cm}^2$ après le premier cycle ;
- Utilisation d'un scellant seulement si la décontamination de la surface s'avère inefficace et faire un suivi de son efficacité ;
- Éviter l'utilisation d'une solution acide pour le nettoyage des surfaces en cuivre-béryllium afin de limiter l'oxydation et d'éviter la génération accrue de béryllium à la surface ;
- Étant donné qu'il semble impossible de décontaminer des pièces en cuivre-béryllium, mettre en place un programme de prévention complet afin de réduire l'exposition des travailleurs au béryllium ;
- Afin de vérifier l'efficacité de la décontamination, faire des prélèvements de surface sur tous les types de surface ;
- Utiliser la technique de prélèvement de surface par aspiration lorsque le prélèvement avec lingettes humides est inadéquat ;
- Connaître les limites de la technique colorimétrique avec le ChemTest[®] avant son utilisation :
 - Ne réagit pas à la présence de l'oxyde de béryllium (BeO) ;
 - N'est pas efficace lorsqu'il y a beaucoup de poussière ou présence d'huile ;
 - Peut être utilisée pour la vérification de l'efficacité du nettoyage lorsque BeO est absent ;

Les recommandations d'ordre général seraient de :

- Porter les équipements de protection respiratoire ainsi qu'une protection cutanée lors des travaux de nettoyage et de décontamination ;
- Mettre à la disposition des travailleurs un vestiaire double, cloisonner et mettre en pression négative la zone où se déroulent les travaux afin d'éviter la contamination des locaux connexes à la zone de travaux.

Pour les études futures :

- Ne pas utiliser le mélange de poussière de béryllium et d'aluminium (AlBeMet) comme matériel de référence pour valider une méthode d'échantillonnage ou d'analyse.
- Vérifier si un temps de contact plus long entre le filtre ChemTest[®] et la surface permettrait la détection de l'oxyde de béryllium.
- Pour le ChemTest[®], vérifier si l'utilisation d'une solution plus acide que H₂SO₄ à 10 % aiderait à la solubilisation du BeO sans nuire à l'enchaînement des réactions chimiques menant à la coloration du filtre.

9. RÉFÉRENCES

Alconox[®], site de la compagnie : <http://www.alconox.com/>

Ashley K., Brisson M.J., Jahn D. (2005). Standard methods for beryllium sampling and analysis: availabilities and needs. *Journal of ASTM International*; 2(9): 1-12.

Ashley K., Applegate G.T., Wise T.J., Fernback J.E., Goldcamp M.J. (2007). Evaluation of a standardized micro-vacuum sampling method for collection of surface dust. *J Occup and Environ Hyg.* 4: 215-223.

ASTM designation E 1575-98, Standard practice for pressure water cleaning and cutting. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998.

ASTM standard D 6966, Standard Practice for Collection of Settled Dust Samples Using Wipe Sampling Methods for Subsequent Determination of Metals. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003.

ASTM standard D 7144, Standard Practice for Collection of Surface Dust by Micro-vacuum Sampling for Subsequent Metals Determination. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

Bai Z., Yiin L-M., Rich D.Q., Adgate J.L., Ashley P.J., Liroy P.J., Rhoads G.G., Zhang J. (2003). Field evaluation and comparison of five methods of sampling lead dust on carpets. *AIHA Journal.* 64: 528-532.

Belkhiat S. (1998). Cinétique de formation du BeO a la surface d'un alliage Cu-Be. *Ann Chim Sci Mat.* 23: 445-454.

Brisson M.J., Ashley K., Stefaniak A.B., Ekechukwu A.A., Creek K.L. (2006). Trace-level beryllium analysis in the laboratory and in the field : state of the art, challenges and opportunities. *J Environ Monit.* 8: 605-611.

Byrne M.A. (2000). Suction methods for assessing contamination on surfaces. *Ann occup Hyg.* 44(7): 523-528.

Conférence internationale de la recherché sur le béryllium : The 3rd international conference on beryllium disease, 16-19 octobre 2007, Philadelphie, États-Unis. http://internationalbeconference07.com/index.php?option=com_docman&Itemid=65

Creek K.L., Whitney G., Ashley K. (2006). Vacuum sampling techniques for industrial hygienists, with emphasis on beryllium dust sampling. *J Environ Monit.* 8 : 612-618.

CSST et IRSST (2002). Guide pratique de protection respiratoire. Lara J., Venne M.56 p. <http://www.prot.resp.csst.qc.ca/GuideAP.shtml>

- CSST (Commission de la santé et de la sécurité du travail), Réseau de la Santé, IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail) et ASP (associations sectorielles paritaires) visées. (2004). 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. http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/6BE18DFD-A96A-4E1D-8E69-6AC769F73624/4480/DC_200_2225.pdf
- CSST, Réseau de la Santé, IRSST et ASP visées. (2005). Opération béryllium. Activités dans les établissements du secteur de l'aéronautique et dans des établissements d'usage de pièces aéronautiques. http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/BC3527F1-8648-45D2-A389-434F5A200872/3913/Rapport_aeronautique_final2.pdf
- CSST, Réseau de la Santé, IRSST et ASP visées. (2006). Opération béryllium. Activités dans les établissements du secteur de l'environnement. <http://www.csst.qc.ca/NR/rdonlyres/45E86FEF-95E9-48FD-9BBE-980E205EA663/3912/RapportEnvironnementOctobre2008.pdf>
- Cummings K..J., Deubner D.C., Day G.A., Henneberger P.K., Kitt M.M., Kent M.S., Kreiss K., Schuler C.R. (2007). Enhanced preventive programme at a beryllium oxide ceramics facility reduces beryllium sensitization among new workers. *Occup Environ Med.* 64(2): 134-140.
- Day G.A., Stefaniak A.B., Weston A., Tinkle S.S. (2006). Beryllium exposure: dermal and immunological considerations. *Int Arch Occup Environ Health.* 79: 161-164.
- Deubner D.C., Lowney Y.W., Paustenbach D.J., Warmerdam J. (2001). Contribution of incidental exposure pathways to total beryllium exposures. *Appl Occup Env Hyg.* 16(5): 568-578.
- Deubner D., Kelsh M., Shum M., Maier L., Kent M., Lau E. (2001). Beryllium sensitization, chronic beryllium disease, and exposures at a beryllium mining and extraction facility. *App Occu Environ Hyg.* 16(5): 579-592.
- Dion C., Perrault G. (2004). Nettoyage et décontamination des lieux de travail où il y a présence de béryllium, Synthèse des bonnes pratiques. IRSST, 26 p. http://www.irsst.qc.ca/fr/publicationirsst_878.html
- Dixon S., Tohn E., Rupp R., Clark S. (1999). Achieving dust lead clearance standards after lead hazard control projects : An evaluation of the HUD-recommended cleaning procedure and an abbreviated alternative. *App Occ Env Hyg.* 14: 339-344.
- Dufay, S.K.; Archuleta, M. (2006) Comparison of collection efficiencies of sampling methods for removable beryllium surface contamination. *J Environ Monit.* 8(6): 630-633.
- Farfel M.R., Lees P.S., Rohde C.A., Lim B.S., Bannon D., Chisolm J.J., Jr. (1994). Comparison of a wipe and a vacuum collection method for the determination of lead in residential dusts. *Environ Res.* 65(2): 291-301.
- Gouvernement du Québec (2007). Règlement sur la santé et la sécurité du travail. S-2.1, r.19.01, Décret 1120-2006. Éditeur officiel du Québec. http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/lois_et_reglements/liste_reglements.php?alpha=S-2.1#

- Grinshpun S.A., Choe K.T., Trunov M., Willeke K., Menrath W., Friedman W. (2002). Efficiency of final cleaning for lead-based paint abatement in indoor environments. *App Occ Env Hyg.* 17(3): 222-234.
- Henneberger P.K., Cumro D., Deubner D.C., Kent M.S., McCawley M., Kreiss K. (2001). Beryllium sensitization and disease among long-term and short-term workers in a beryllium ceramics plant. *Int Arch Occup Environ Health.* 74: 167-176.
- INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité (2005). Travailler en sécurité avec l'eau à haute pression ; Conseils aux opérateurs. Werlé R. ED819. 34 pages.
- IRSST (2005). Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail, Be. http://www.irsst.qc.ca/fr/_RSST7440-41-7.html
- IRSST (2008). Consignes d'utilisation de la trousse #3080, frottis de surface pour le béryllium avec chiffon humide. <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/fr/Labos/consigne3080.pdf>
- IRSST (2008b). Méthode analytique 359 - Détermination du béryllium [7440-41-7] dans l'air des lieux de travail. <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/M-359-fr.pdf>
- Johnson J.S., Foote K., McClean M., Cogbill G. (2001). Beryllium Exposure Control Program at the Cardiff Atomic Weapons Establishment in the United Kingdom. *App Occ Env Hy.* 16(5): 619-630.
- Kelleher P.C., Martyny J.W., Mroz M.M., Maier L.A., Rutenber 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.
- Kolanz M.E., Madl A.K., Kelsh M.A., Kent M.S., Kalmes R.M., Paustenbach D.J. (2001). A comparison and critique of historical and current exposure assessment methods for beryllium: implications for evaluating risk of chronic beryllium disease. *Appl Occup Environ Hyg.* 16(5): 593-614.
- Kreiss K., Mroz M.M., Newman L.S., Martyny J., Zhen B. (1996). Machining risk of beryllium disease and sensitization with median exposure below 2 µg/m³. *Am J Ind Med.* 30: 16-25.
- Kreiss K., Mroz M.M., Zhen B., Wiedemann H., Barna B. (1997). Risks of beryllium disease related to work processes at a metal, alloy, and oxide production plant. *Occup Environ Med.* 54: 605-612.
- Lanphear B.P., Emond M., Jacobs D.E., Weitzman M., Tanner M., Winter N.L., Yakir B., Eberly S. (1995). A side-by-side comparison of dust collection methods for sampling lead-contaminated house dust. *Environ Research.* 68: 114-123.
- Lichtenwalner C.P. (1992). Evaluation of wipe sampling procedures and elemental surface contamination. *Am Ind Hyg Assoc J.* 53(10): 657-659.
- Madl A.K., Unice K., Brown J.L., Kolanz M.E., Kent M.S. (2007). Exposure-response analysis for beryllium sensitization and chronic beryllium disease among workers in a beryllium metal machining plant. *J Occup and Environ Hyg.* 4(6): 448-466.

Microteq, beryllium ChemTest[®], site de la compagnie:

<http://www.nextteq.com/productDetails.aspx?id=6567>

Nakao F., Birakawa M., Yamamoto T. (1979). Quantitative depth profiling analyses of the surface layer in Be-Cu dynodes. *J Vac Sci Technol.* 16(4): 1017-1019.

Newman L.S., Mroz M., Balkissoon R., Maier L.A. (2005). Beryllium sensitization progresses to chronic beryllium disease: a longitudinal study of disease risk. *Am J Respir Crit Care Med.* 171: 54-60.

Reynolds S.J., Etre L., Thorne P.S., Whitten P., Selim M., Pependort W.J. (1997). Laboratory comparison of vacuum, OSHA, and HUD sampling methods for lead in household dust. *AIHA Journal.* 58: 439-446.

Rocky Flats Environmental Technology Site (1997). Site beryllium characterization, sampling and analysis plan. 57 pages.

<http://www.hss.energy.gov/HealthSafety/WSHP/be/guide/itk/12689.pdf>

Royster G.W., Fish B.R. (1967). Techniques for assessing removable surface contamination. In: Fish BR, ed. *Surface contamination, proceedings of a symposium held at Gatlingsburg, Tennessee.* New York: Pergamon Press, 201-7.

Sackett H.M., Maier L.A., Silveira L.J., Mroz M.M., Ogden L.G., Murphy J.R., Newman L.S. (2004). Beryllium medical surveillance at a former nuclear weapons facility during cleanup operations. *J Occup Environ Med.* 46: 953-961.

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

Stange A.W., Hilmas D.E., Furman E.J., Gatcliffe T.R. (2001). Beryllium sensitization and chronic beryllium disease at a former nuclear weapons facility. *App Occ Env Hyg.* 3: 405-417.

Taylor T.P., Sauer N.N. (2002). Beryllium colorimetric detection for high speed monitoring of laboratory environments. *Journal of Hazardous Materials.* 93(3): 271 – 283.

Tekleab T.M., Mihaylov G.M., Kirolos K.S. (2006). Onsite direct-read system for semi-quantitative detection of traces of beryllium on surfaces. *J Environ Monit.* 8: 625-629.

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

US Department of Housing and Urban Development (1995). Guidelines for the evaluation and control of lead-based paint hazards in housing. US HUD/Office of lead hazard control, Washington, DC. <http://www.hud.gov/offices/lead/guidelines/hudguidelines/>

US Federal Register (1999). Chronic beryllium disease prevention program; final rule, DOE 10 CFR Part 850, 68854-68914. <http://www.hss.doe.gov/healthsafety/WSHP/be/docs/berule.pdf>

- US Navy Environmental Health Center (2002). Indoor firing ranges industrial hygiene technical guide. Technical manual NEHC – TM6290.99-10 Rev.1 <http://www-nehc.med.navy.mil/downloads/ih/tm6290.99-10Rev1.pdf>
- Yiin L-M., Lu S-E., Sannoh S., Lim B.S., Rhoads G.G. (2004). Evaluation of cleaning methods applied in home environments after renovation and remodelling activities. Environ Research. 96: 156-162.

ANNEXE A : PRÉPARATION DES COMPOSÉS DE BÉRYLLIUM (TESTS SUR LES SOLUTIONS NETTOYANTES)

Acétate de béryllium

Une solution de béryllium à 200 µg/L a été préparée par dilution avec de l'acide nitrique 1% d'une solution commerciale d'acétate de béryllium contenant 10 000 mg/L de Be (SPEX CertiPrep® Group, Lot# W10-115Be). Un sommaire de la procédure est présenté au tableau A1. Afin de vérifier la masse de béryllium de la solution finale, trois essais ont été réalisés directement dans des béciers de digestion et ont été analysés par ICP-MS. La quantité moyenne de Be était de 0,203 µg avec un coefficient de variation (CV) de 2,8%.

Tableau A1 : Préparation de la solution d'acétate de béryllium

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Concentration dans la solution		10 000 mg/L	20 mg/L	200 µg/L
Volume prélevé		200 µL	1 000 µL	1 000 µL
Dilution dans		100 mL HNO ₃ 1%	100 mL HNO ₃ 1%	
Concentration résultante	10 000 mg/L	20 mg/L	200 µg/L	
Quantité de Be		2 mg	20 µg	0,2 µg

Chlorure de béryllium (BeCl₂)

Le facteur de conversion utilisé pour le BeCl₂, basé sur le rapport entre le poids atomique du Be (9 g/mol) et la masse molaire du chlorure de béryllium (79,9 g/mol), était de 0,1126. La solution a été préparée en utilisant de la poudre de BeCl₂ (fourni par la compagnie Fluka) qui a été dissoute dans de l'eau dé-ionisée pour obtenir une masse de béryllium finale de 0,2 µg. Le sommaire des manipulations est présenté au tableau A2. La masse moyenne de Be obtenue, suite à la vérification de la masse de Be de la solution finale par ICP-MS, était de 0,204 µg (CV de 0,6%).

Tableau A2 : Préparation de la solution de BeCl₂

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Masse de BeCl₂	182,2 mg poudre	182,2 mg poudre		
Concentration dans la solution			20,52 mg/L Be	205,2 µg/L Be
Volume prélevé			1 000 µL	1 000 µL
Dilution dans	1 000 mL eau	1 000 mL eau	1 000 mL eau	
Concentration résultante		182,2 mg/L BeCl ₂ 20,52 mg/L Be	205,2 µg/L Be	
Quantité de Be		20,52 mg	20,52 µg	0,2 µg

Oxyde de béryllium (BeO)

Le facteur de conversion pour le BeO, basé sur le rapport entre le poids atomique du Be (9 g/mol) et la masse molaire de l'oxyde de béryllium (25 g/mol), était de 0,36. La suspension a été préparée en utilisant la poudre de BeO (de la compagnie Fluka) et l'isopropanol afin d'obtenir une masse de Be de 0,38 µg. Le sommaire des manipulation est présenté au tableau A3. La masse moyenne de Be obtenue suite à la vérification de la masse de Be de la solution finale par ICP-MS était de 0,387 µg avec un CV de 0,3%.

Tableau A3 : Préparation de la suspension de BeO

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Masse de BeO	141,8 mg	141,8 mg		
Concentration dans la solution			51,05 mg/L Be	255,25 µg/L Be
Volume prélevé			5 000 µL	1 500 µL
Suspension dans	1 000 mL isopropanol	1 000 mL isopropanol	1 000 mL isopropanol	10 mL HNO ₃ (1%)
Concentration résultante		141,8 mg/L BeO 51,05 mg/L Be	255,25 µg/L Be	
Quantité de Be		51,05 mg	255,25 µg	0,387 µg

ANNEXE B : PRÉPARATION DES COMPOSÉS DE BÉRYLLIUM (TESTS SUR LES TECHNIQUES DE PRÉLÈVEMENT)

Acétate de béryllium

Une solution de béryllium à 100 µg/L a été préparée par dilution avec de l'acide nitrique 1% d'une solution commerciale d'acétate de béryllium contenant 10 000 mg/L de Be (SPEX CertiPrep®Group, Lot# W10-115Be). Un sommaire de la procédure est présenté au tableau B1. Afin de vérifier la masse de béryllium de la solution finale, trois essais ont été réalisés directement dans des béchers de digestion pour ensuite être analysé par ICP-MS. La masse moyenne de Be obtenue était de 0,10 µg avec un coefficient de variation (CV) de 0,99%.

Tableau B1 : Préparation de la solution d'acétate de béryllium

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Concentration dans la solution		10 000 mg/L Be	100 mg/L Be	100 µg/L Be
Volume prélevé		1 mL	0,1 mL	1 mL
Dilution dans		100 mL HNO ₃ 1%	100 mL HNO ₃ 1%	
Concentration résultante	10 000 mg/L	100 mg/L Be	100 µg/L	
Quantité de Be		10 mg	0,01 mg	0,1 µg

Chlorure de béryllium (BeCl₂)

Le facteur de conversion utilisé pour le BeCl₂, basé sur le rapport entre le poids atomique du Be (9 g/mol) et la masse molaire du chlorure de béryllium (79,9 g/mol), était de 0,1126. La solution a été préparée en utilisant de la poudre de BeCl₂ (fourni par la compagnie Fluka) qui a été diluée dans de l'eau dé-ionisée pour obtenir une concentration de béryllium de 100 µg/L. Le sommaire des manipulations est présenté au tableau B2. La masse moyenne de Be, obtenue suite à une vérification de la solution finale par ICP-MS, était de 0,10 µg (CV de 0,96%).

Tableau B2 : Préparation de la solution de BeCl₂

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Masse de BeCl₂	92,5 mg poudre	92,5 mg poudre		
Concentration dans la solution			20,83 mg/L Be	104 µg/L Be
Volume prélevé			1 mL	1 mL
Dilution dans	500 mL eau	500 mL eau	200 mL eau	
Concentration résultante		185 mg/L BeCl ₂ 20,83 mg/L Be	104 µg/L Be	
Quantité de Be		10,42 mg	104 µg	0,104 µg

Oxyde de béryllium (BeO)

Le facteur de conversion pour le BeO était de 0,36, basé sur le rapport entre le poids atomique du Be (9 g/mol) et la masse molaire de l'oxyde de béryllium (25 g/mol). La suspension a été préparée en utilisant la poudre de BeO (fourni par la compagnie Fluka) et de l'isopropanol afin d'obtenir une concentration de Be de 100 µg/L. Le sommaire des manipulation est présenté au tableau B3. La masse moyenne de Be, obtenue suite à une vérification de la masse de Be de la solution finale par ICP-MS, était de 0,09 µg (CV de 0 %).

Tableau B3 : Préparation de la suspension de BeO

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Masse de BeO	132,7 mg	132,7 mg		
Concentration dans la solution			95,60 mg/L Be	95,60 µg/L Be
Volume prélevé			5 mL	1 mL
Suspension dans	500 mL isopropanol	500 mL isopropanol	1 000 mL isopropanol	10 mL HNO ₃ (1%)
Concentration résultante		265,4 mg/L BeO 95,60 mg/L Be	95,60 µg/L Be	
Quantité de Be		47,77 mg	95,60 µg	0,09 µg

Béryllium - aluminium (AlBeMet)

La suspension a été préparée en utilisant un mélange de poussières de béryllium (62%) et aluminium (38%), offert par la compagnie Brush Wellman, ainsi que de l'isopropanol pour obtenir une concentration de Be de 100 µg/L. Le sommaire des manipulation est présenté au tableau B4. La masse moyenne de Be, obtenue suite à la vérification de la masse de Be de la solution finale par ICP-MS, était de 0,033 µg avec un CV de 42%.

Tableau B4 : Préparation de la suspension de AlBeMet

	Solution initiale	Étape 1	Étape 2	Solution finale
Masse de AlBeMet	87 mg	87 mg		
Concentration dans la solution			107,88 mg/L Be	107,88 µg/L Be
Volume prélevé			1 mL	1 mL
Suspension dans	500 mL isopropanol	500 mL isopropanol	1 000 mL isopropanol	10 mL HNO ₃ (1%)
Concentration résultante		174 mg/L AlBeMet 107,88 mg/L Be	107,88 µg/L Be	
Quantité de Be		53,94 mg	107,88 µg	0,108 µg

ANNEXE D : ÉVALUATION DES TECHNIQUES D'ÉCHANTILLONNAGE DE SURFACE SUR LE TERRAIN

Tableau D1 : résultats des prélèvements de surface pour l'entreprise 3

	Localisation	Type et conditions de la surface	(µg Be/100 cm ²)		Rapport frottis / aspiration
			Frottis	Aspiration	
1	Dessus luminaire (fluorescent)	Métal peinturé, lisse beaucoup de poussière	0,32	0,22	1,5
2	Dessus luminaire (fluorescent)	Métal peinturé, faible porosité, faible accumulation de poussière	26	6,7	3,9
3	Dessus conduits de ventilation	Métal peinturé, faible porosité, poussière résiduelle car pas totalement prélevée	44	38	1,2
3A	Plafond (près de échantillon 3)	Placoplâtre peinturé, surface inégale	0,06	0,0035	17
4	Dessus bureau étudiant	Mélamine peinturé, lisse	< VMR	0,0008	31
5	Bord de fenêtre	Bois teint, surface défraîchie	0,16	0,0025	64
6	Dessus bureau étudiant (derrière échantillon 4)	Mélamine, lisse	-	-	-
7	Dessus d'un système d'aspiration (au-dessus d'un bureau étudiant de l'échantillon 4)	Métal peinturé, lisse	0,1	-	-
8	A l'intérieur d'une hotte	Métal, lisse, surface graisseuse	0,23	-	-
9	Dessus de la hotte	Métal, lisse	0,19	-	-

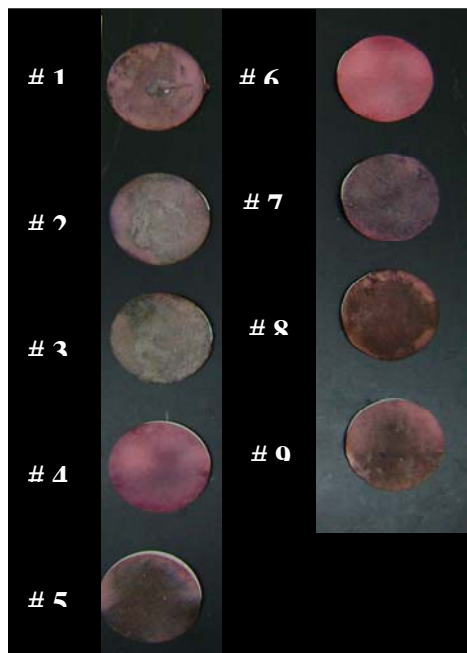


Figure 1D : Résultats des filtres ChemTest™ à l'entreprise 3

Tableau D2 : résultats des prélèvements de surface pour l'entreprise 6

	Localisation	Type et conditions de la surface	(µg Be/100 cm ²)		Rapport frottis / aspiration
			Frottis	Aspiration	
1	Scie horizontale	Métal, présence de résidus fins métalliques, huileuse	0,11	0,16	0,68
2	Scie horizontale	Métal, moins huileuse que l'échantillon 1	0,16	0,062	2,6
3	Table de travail	Panneau aggloméré de bois, sale, non huileux	<VMR	<VMR	1,0
4	Machine (tour)	Métal, non huileux	<VMR	<VMR	1,0
5	Machine (tour)	Métal, poussiéreux, non huileux	<VMR	0,0051	4,9
6	Machine (tour)	Métal, un peu huileux	<VMR	0,016	1,6
7	Machine	Métal peinturé, faible accumulation de poussière, non huileux	<VMR	0,0048	5,2
8	Machine	Métal peinturé, faible accumulation de poussière, non huileux	<VMR	0,0056	4,5
9	Table polissage / soudage	Bois aggloméré, un peu sale, non poussiéreux, non huileux	<VMR	0,003	8,3
10	Mur	Placoplâtre peinturé, propre	<VMR	-	-
11	Mur	Placoplâtre peinturé, propre	<VMR	-	-
12	Cadre de porte	Bois peinturé, très sale, poussiéreux, huileux	1,2	-	-
13	Cadre de porte	Bois peinturé, très sale, poussiéreux, huileux	1,4	-	-

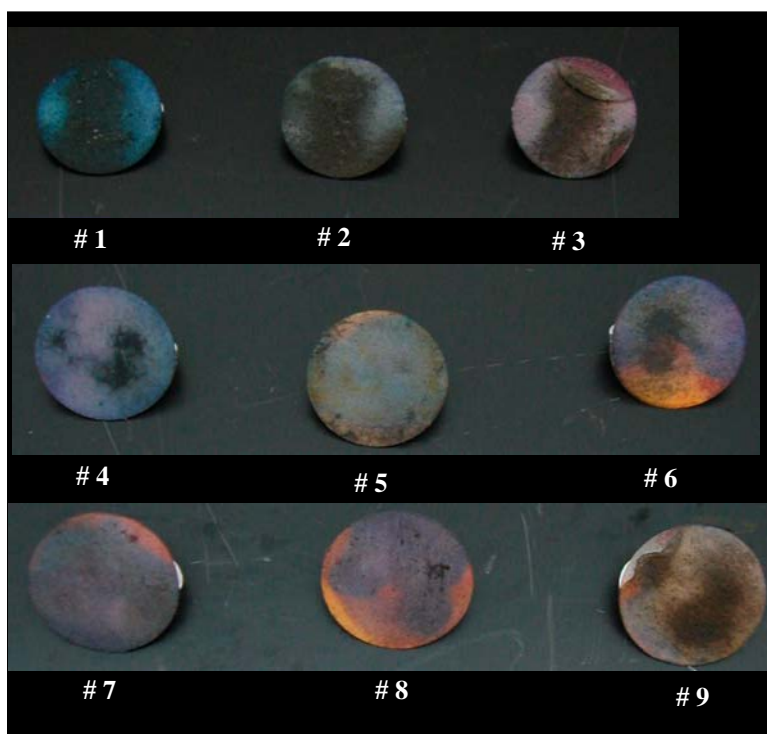


Figure 2D : Résultats des filtres ChemTest™ à l'entreprise 6

Tableau D3 : résultats des prélèvements de surface pour l'entreprise 7

	Localisation	Type et conditions de la surface	Frottis
			($\mu\text{g Be}/100 \text{ cm}^2$)
1	Rectifieuse	Bois, sale, non huileux	0,08
2	Table de soudage	Métal, sale, un peu huileux	<VMR
3	Table de polissage	Bois aggloméré, sale et endommagé, un peu huileux	<VMR
4	Machine	Métal, sale et huileux	0,54
5	Machine	Métal, assez propre, huileux	0,08
6	Panneau électrique	Métal, propre	<VMR
7	Colonne	Métal peinturé, rugueux	0,11

**Figure 3D : Résultats des filtres ChemTest™ à l'entreprise 7**