

POINT DE REPÈRE

EXPOSITION PROFESSIONNELLE AU BÉRYLLIUM DANS LES ENTREPRISES FRANÇAISES

Évaluation des niveaux d'exposition atmosphérique et de contamination surfactive

Une campagne d'évaluation de l'exposition professionnelle au béryllium (Be) a été menée en France de fin 2004 à fin 2006. Des mesures d'exposition par prélèvement et analyse de l'air des lieux de travail ainsi que des mesures de contamination de surface ont été réalisées dans 95 établissements appartenant à 37 secteurs d'activité. Les résultats de cette étude montrent que les concentrations atmosphériques en béryllium dépassent la valeur limite de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ recommandée en France. Les activités et métiers les plus exposés, en moyenne arithmétique, sont ceux de la métallurgie et de la fabrication de composants électroniques. Les niveaux de contamination surfaciques sont également importants et dépassent fréquemment les seuils proposés par différents organismes. Au vu de ces résultats, une prévention basée sur la substitution du béryllium, la maîtrise des procédés, la décontamination des surfaces polluées couplée à une surveillance médicale appropriée devrait être mise en place.

Le béryllium (Be), sous forme métallique, est un métal gris-argent, brillant et très léger. Il est plus rigide que l'acier et très résistant à la torsion. Son point de fusion est comparable à celui des autres métaux légers. Sa capacité d'absorption calorifique est cinq fois plus élevée que celle du cuivre. Il allie une grande stabilité dimensionnelle à une grande résistance à la corrosion. Non magnétique, il possède une bonne conductivité thermique et présente une bonne perméabilité aux rayons X.

Les alliages contenant du béryllium en faible quantité ont des propriétés mécaniques, électriques et thermiques améliorées. En effet, le béryllium contribue à améliorer leurs qualités de dureté, de résistance électrique, de conductivité thermique, de résistance à la corrosion, aux frottements et à la fatigue.

L'oxyde de béryllium présente d'excellentes propriétés de dureté et de résistance. C'est un bon isolant électrique et un bon conducteur thermique. Il est également transparent aux micro-ondes. L'oxyde de béryllium est notamment employé pour la fabrication de composants électroniques.

- ▶ Raymond VINCENT,
INRS, département Métrologie des polluants
- ▶ Jacques CATANI,
Laboratoire interrégional de chimie, Marseille
- ▶ Yvon CRÉAU, Anne-Marie FROCAUT,
Laboratoire interrégional de chimie, Rouen
- ▶ Andrée GOOD,
Laboratoire interrégional de chimie, Lyon
- ▶ Pierre GOUTET,
Laboratoire interrégional de chimie de l'Est, Nancy
- ▶ Alain HOU,
Laboratoire interrégional de chimie, Bordeaux
- ▶ Fabrice LERAY,
Laboratoire interrégional de chimie, Nantes
- ▶ Marie-Ange ANDRÉ-LESAGE,
Laboratoire de toxicologie, Paris
- ▶ Alain SOYEZ,
Laboratoire interrégional de chimie toxicologie, Lille

Cet article a été initialement publié dans *Annals of Occupational Hygiene*, volume 53, Numéro 4, pp. 363-372, 2009. La version française est produite avec l'aimable autorisation d'Oxford University Press.

© 2010 British Occupational Hygiene Society Published by Oxford University Press.

Compte tenu de ces différentes propriétés, le béryllium et ses composés sont employés dans un grand nombre de secteurs d'activité : métallurgie, aéronautique, bijouterie, optique, électronique, nucléaire, armement, etc.

Le béryllium et ses composés sont toxiques et ont été classés comme cancérogènes pour l'homme (groupe 1) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) en 1993. Selon le CIRC, le béryllium peut provoquer le cancer du poumon chez l'homme. En Europe, le béryllium et ses composés sont classés comme cancérogènes de catégorie 1B : peut provoquer le cancer par inhalation (étiquetage H350i dans le règlement CLP).

Chez l'homme, l'exposition à des aérosols contenant du béryllium peut entraîner une sensibilisation (Newman et al., 2005), une réponse immunitaire à médiation cellulaire pouvant être mise en évidence par un test de prolifération lymphocytaire au béryllium (BeLPT) (Stange et al., 2004). Les sujets sensibilisés risquent de développer ensuite une maladie chronique causée par le béryllium (MCB) (Day et al., 2005 ; Newman et al., 2005), une pathologie pulmonaire d'évolution lente.

Les études épidémiologiques de ces 15 dernières années montrent que le seuil d'exposition de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ fixé pour le béryllium ne permet pas de prévenir les risques (Kreiss et al., 2007). Par ailleurs, il n'a pas été possible d'établir clairement une relation dose-effet, ni une concentration atmosphérique qui garantisse la sécurité de tous les travailleurs.

La mise en œuvre du béryllium ou de ses alliages, dans des procédés thermiques notamment, se caractérise par l'émission d'aérosols de particules fines et ultra-fines dont les propriétés de surface pourraient jouer un rôle dans la prévalence de la sensibilisation au béryllium ou de la MCB (Stefaniak et al., 2003, 2004 ; Thorat et al., 2003). L'exposition cutanée à ces particules ultra-fines de béryllium ou de ses composés pourrait également induire une sensibilisation au béryllium (Tinkle et al., 2003 ; Day et al., 2005).

En France, la valeur limite d'exposition professionnelle – VLEP 8h - recommandée pour le béryllium et ses composés est actuellement de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ (INRS, 2007). Aux Etats Unis, et sur la base

des résultats d'études épidémiologiques, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) recommande, depuis 2008, une TLV-TWA - 8h - de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ au lieu de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ (ACGIH, 2008).

Aux Etats Unis, le nombre de travailleurs exposés au béryllium et à ses composés se situe entre 54 400 et 134 000 (Henneberger et al., 2004). En France, dans le cadre du projet CAREX (Système international d'information sur l'exposition professionnelle aux agents cancérogènes en Europe), la population potentiellement exposée au béryllium pour la période 1990-1993 a été estimée à 11 620 travailleurs (Vincent et al., 1999).

Les données d'exposition professionnelle au béryllium en France sont peu nombreuses et correspondent à des valeurs mesurées au début des années 90 dans les laboratoires de prothésistes dentaires, les ateliers de bijouterie et chez les utilisateurs d'alliages cupro-béryllium (Peltier et al., 1991, 1994, 1997). Compte tenu des avancées récentes dans la connaissance de la toxicité de ce métal et du rôle possible de l'exposition cutanée (Day et al., 2007) dans le processus de sensibilisation, l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) et les huit laboratoires de chimie des Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) ont décidé de mener une campagne nationale d'évaluation des expositions et contaminations liées à l'utilisation professionnelle du béryllium et de ses composés. Menée de fin 2004 à fin 2006, cette étude s'inscrivait dans le cadre d'une démarche générale visant à alimenter la base de données COLCHIC de l'INRS (Vincent et Jeandel, 2001) et a bénéficié du concours de la CNAMTS, Direction des risques professionnels.

MÉTHODES

SÉLECTION DES ENTREPRISES

Une enquête par questionnaire a été menée dans le courant de l'année 2004, auprès d'un échantillon représentatif de 5 000 établissements industriels, afin de cibler les secteurs d'activité utilisateurs de béryllium ou de composés du béryllium en France. A partir des résultats de cette enquête, les laboratoires de chimie

des CRAM ont sélectionné les établissements à prendre en compte dans l'étude. D'une manière générale, la priorité a été donnée aux établissements appartenant aux secteurs d'activité suivants :

- mécanique générale ;
- fabrication de ressorts ;
- fabrication de composants électroniques actifs ;
- fabrication d'instrumentation scientifique et technique ;
- chaudronnerie-tuyauterie ;
- production d'aluminium.

Avant de procéder aux mesures d'exposition par prélèvement et analyse de l'air des lieux de travail et aux mesures surfaciques dans l'établissement sélectionné, une visite était organisée pour confirmer l'utilisation de béryllium ou de ses composés, les postes de travail à analyser, le nombre de travailleurs à prendre en compte, etc.

MÉTROLOGIE DE L'EXPOSITION

Les prélèvements et analyses d'air des lieux de travail ont été réalisés suivant la méthode Métropol 003 (Métaux-Métalloïdes) développée conjointement par les laboratoires de chimie des CRAM et de l'INRS (INRS, 2008).

Les prélèvements d'ambiance ou individuels ont été effectués à un débit de 2 l ou 1 l.min⁻¹ à l'aide d'une cassette fermée de 37 mm de diamètre avec un orifice de 4 mm de diamètre, contenant un filtre en fibre de quartz. La cassette fermée était située à proximité immédiate des voies respiratoires des travailleurs pour les prélèvements individuels, et à une hauteur correspondant à la zone respiratoire des travailleurs pour les prélèvements d'ambiance. Des pompes de prélèvement autonomes et à débit régulé ($\pm 5\%$) ont été utilisées pour réaliser ces mesures. Ces prélèvements (d'ambiance ou individuels) ont été effectués sur une partie de la durée du poste de travail, généralement sur une période de 4-6 h, représentative de l'exposition sur la durée entière du poste de travail (moyenne = 4 h et 17 min). En général, pour des raisons pratiques, il n'était pas possible d'effectuer des prélèvements sur une journée entière. Les prélèvements ont également été effectués sur une partie de la journée pour éviter de surcharger les filtres. Les informations sur la représentativité des prélèvements ont été collectées et codées pour chaque mesure.

A l'issue des prélèvements, les orifices de la cassette ont été fermés par des bouchons avant traitement des cassettes pour analyse.

La récupération des aérosols piégés sur le filtre a été réalisée par lavage, sous ultra-sons, de la cassette et du filtre avec 5 ml d'un mélange d'acides fluorhydrique et nitrique (3/2). Les méthodes de mise en solution utilisant de l'acide fluorhydrique ou de l'acide sulfurique sont adaptées pour la dissolution de composés très insolubles tels que l'oxyde de béryllium (BeO) calciné. Cette méthode mettant en œuvre un mélange d'acides fluorhydrique et nitrique a été choisie pour sa capacité à solubiliser le filtre en fibre de quartz. L'extraction des aérosols a été suivie de plusieurs rinçages de la cassette ou des filtres avec de l'eau ionisée, et le volume final a été ajusté à 25 ml. Cette méthode tient compte à la fois de l'aérosol récupéré sur le filtre et des particules déposées sur les parois internes de la cassette. La solution d'extraction a ensuite été analysée généralement par spectrométrie d'émission atomique par plasma à couplage inductif ou, plus rarement, par spectrométrie d'absorption atomique avec four selon le type d'appareil disponible dans chaque laboratoire. La quantification a été réalisée par étalonnage externe à partir d'une solution d'étalonnage certifiée contenant $1\ 000\ \mu\text{g ml}^{-1}$ de béryllium. Durant cette étude, en fonction des conditions variables de prélèvement et d'analyse liées à la nature et à l'ancienneté des spectromètres, la limite de quantification en béryllium se situait à $0,015\ \mu\text{g m}^{-3}$ pour la médiane et à $0,026\ \mu\text{g m}^{-3}$ pour la moyenne. Cette limite de détection variait de $0,001\ \mu\text{g m}^{-3}$ à $0,2\ \mu\text{g m}^{-3}$ et était supérieure à $0,05\ \mu\text{g m}^{-3}$ pour environ 14 % des mesures. Cette situation semble acceptable au regard de la valeur limite d'exposition professionnelle de $2\ \mu\text{g m}^{-3}$ recommandée en France pour le béryllium : généralement les laboratoires se fixent une limite de quantification correspondant au dixième de la valeur limite soit $0,2\ \mu\text{g m}^{-3}$. Tous les laboratoires impliqués dans cette étude participent à un circuit d'intercomparaison sur les méthodes de dosage et de prélèvement des métaux et des métalloïdes dirigé par l'INRS.

MESURES DE CONTAMINATION DE SURFACES

Une surface de $100\ \text{cm}^2$, délimitée par un gabarit en matière plastique, a été essuyée avec une lingette non tissée à usage unique Ghost Wipes™ (réf. SC 4210) fabriquée par Environmental Express (Mount Pleasant, Caroline du Sud, Etats-Unis). Les lingettes Ghost Wipes™ font $15 \times 15\ \text{cm}$; elle sont imprégnées d'eau désionisée et fournies dans des sachets individuels. Elles sont conformes à la norme ASTM E1792-03 sur le matériel de prélèvement des poussières par essuyage visant à déterminer la concentration surfacique en plomb. Les lingettes Ghost Wipes™ ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour d'autres éléments, dont le béryllium, conformément à la méthode de prélèvement et d'analyse ID-125 G de l'OSHA (OSHA, 2002).

Le gabarit de surface est nettoyé avec une lingette Ghost Wipes™ avant chaque prélèvement ; afin d'éviter toute contamination croisée, l'opérateur porte des gants jetables. Les prélèvements surfaciques se font à l'aide d'une nouvelle lingette, par des mouvements concentriques de plus en plus petits allant du bord extérieur vers le centre de la surface. Après essuyage, la lingette est repliée vers l'intérieur de la surface ayant servi au prélèvement puis placée dans un tube en verre fermé. Les gants sont changés à chaque prélèvement. Pour l'analyse, la lingette est minéralisée par 6 ml d'acide nitrique concentré (68 %) et rincée plusieurs fois avec de l'eau désionisée ; le volume final est ajusté à 20 ml. Le béryllium est dosé dans la solution obtenue par spectrométrie d'émission optique par plasma à couplage inductif (ICP/OES). Le protocole comprenait l'analyse de lingettes non utilisées servant d'échantillons témoins. Cette méthode est équivalente à celle décrite dans la norme ASTM D 6966-03 (ASTM, 2003) ou préconisées par différents organismes (OSHA, 2002 ; Dion et Perrault, 2003 ; NIOSH, 2003). Durant cette étude, la limite de détection était, en moyenne, de $0,06\ \mu\text{g}$ de béryllium par échantillon. Les résultats, exprimés en microgrammes de béryllium par prélèvement, ont été convertis en concentrations surfaciques, soit en microgrammes de béryllium pour 100 centimètres carrés ($\mu\text{g } 100\ \text{cm}^{-2}$).

COLLECTE D'INFORMATIONS

L'ensemble des résultats et des informations collectés durant cette étude ont été stockés et compilés dans la base de données COLCHIC de l'INRS.

Pour chaque étude menée dans un établissement industriel, les techniciens de laboratoire ont noté diverses informations :

- identification de l'établissement (nom, adresse, numéro administratif, code NAF, origine et objet de la demande d'étude) ;
- conditions d'essai (méthode, débit de prélèvement, durée du prélèvement, type d'échantillon prélevé, etc.) ;
- description du poste de travail (présence ou absence de dispositifs de ventilation, tâches effectuées pendant les prélèvements, etc.) ;
- métier ;
- conditions d'analyse (méthodes et techniques utilisées) ;
- résultats d'analyse (substances dosées, unités, etc.).

Ces informations sont codées sur la base de cadres de référence nationaux tels que ceux qui s'appliquent à la catégorie administrative de l'établissement et sur la base de cadres de référence spécifiques au système COLCHIC pour les conditions de prélèvement et d'analyse et la description des postes de travail.

Ces critères sont utiles au moment de l'analyse des données et, notamment, pour évaluer si les doses prélevées sur une partie de la durée du poste de travail sont représentatives de l'exposition durant le poste de travail complet.

RÉSULTATS

Durant cette étude, 645 prélèvements d'air des lieux de travail et 576 prélèvements surfaciques ont été effectués dans 95 établissements appartenant à 37 secteurs d'activité différents selon la Nomenclature des activités françaises (NAF) (INSEE, 2003). En moyenne, chaque laboratoire participant à l'étude est intervenu dans 10 entreprises. Notons que la majorité des prélèvements d'air et des prélèvements surfaciques ont été effectués dans la métallurgie. Ces résultats montrent également que l'effort des laboratoires des CRAM s'est

porté notamment sur des établissements appartenant au secteur du recyclage des déchets. Les caractéristiques de cette étude figurent dans le [Tableau I](#).

ANALYSE GLOBALE

Après suppression des échantillons non conformes aux conditions de prélèvement définies dans le protocole (type de filtre, débit de prélèvement, etc.), cette étude permet de disposer au total de 632 résultats exploitables pour les mesures de concentration de béryllium dans l'air des lieux de travail, soit 278 prélèvements d'ambiance et 354 prélèvements individuels. Ces séries de résultats correspondent à des distributions log-normales, sans différence significative (test de Kolmogorov-Smirnov, $P = 0,39$) entre les prélèvements d'ambiance et les prélèvements individuels (cf. [Figure 1](#)). Compte tenu des conditions de prélèvement et des informations fournies par les techniciens participant à l'étude, plus de 70 % des résultats ($n = 453$) sont représentatifs de l'exposition sur la durée entière du poste de travail, alors que les autres ne sont représentatifs que de l'exposition correspondant à des postes de travail particuliers ($n = 112$). Afin d'exploiter les résultats inférieurs à la limite de quantification ($< lq$), ces résultats ont été divisés par deux ($lq \div 2$). Concernant les prélèvements surfaciques, 554 ont été considérés comme exploitables après suppression des résultats obtenus dans de mauvaises conditions de prélèvement. Les statistiques descriptives de ces séries de résultats figurent dans le [Tableau II](#). Ces résultats indiquent, pour les prélèvements atmosphériques, des expositions moyennes, médianes ou moyennes géométriques très supérieures à la valeur limite de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ proposée en 2008 par l'ACGIH. Globalement, plus de la moitié des résultats sont supérieurs à cette valeur limite (cf. [Figure 1](#)), et des expositions à plusieurs dizaines de microgrammes ont également été mesurées dans les établissements appartenant au secteur de la production de métaux non ferreux et ferreux. Si l'on considère les prélèvements représentatifs du poste de travail complet, la médiane des expositions correspond à $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$, ce qui signifie que le niveau d'exposition de la moitié des lieux de travail soumis à l'étude était supérieur à la valeur limite d'exposition proposée par l'ACGIH.

Pour les prélèvements surfaciques, les niveaux de contamination sont,

TABLEAU I

Répartition du nombre d'établissements visités, des mesures d'exposition (air) et de contamination (surface) par secteur d'activité

Secteur d'activité (code NAF, libellé)	Établissements	Air	Surface	
371Z	Récupération de matières métalliques recyclables	4	67	0
372Z	Récupération de matières non métalliques recyclables	1	55	0
275C	Fonderie d'acier	5	54	33
275G	Fonderie autres métaux non ferreux	4	49	15
285D	Mécanique générale	17	49	191
274C	production d'aluminium	2	44	7
332B	Fabrication d'instrumentation scientifique et technique	4	36	85
331B	Fabrication d'appareils médicochirurgicaux	7	30	32
283C	Chaudronnerie-tuyauterie	2	26	5
515C	Commerce de gros de minerais et métaux	2	25	6
362C	Bijouterie, joaillerie, orfèvrerie	3	22	10
351A	Construction et réparation de navires	1	16	0
287H	Fabrication de ressorts	6	15	73
332A	Fabrication d'équipement d'aide à la navigation	2	14	16
274K	Première transformation du cuivre	2	13	4
321A	Fabrication de matériel de distribution et de commande électrique pour basse tension	2	13	10
275E	Fonderie de métaux légers	1	12	0
322B	Fabrication d'appareils de téléphonie	2	12	6
514S	Autres commerces de gros de biens de consommation	1	11	0
333Z	Fabrication d'équipements de contrôle des processus industriels	1	10	18
454D	Menuiserie métallique : serrurerie	6	9	0
284B	Découpage, emboutissage	1	8	0
295N	Fabrication de moules et modèles	2	8	18
366A	Bijouterie fantaisie	1	8	0
515Q	Commerce de gros de déchets et débris	1	7	8
321C	Fabrication de composants électroniques actifs	1	6	11
281A	Fabrication de constructions métalliques	1	5	0
295M	Fabrication de machines pour le travail du caoutchouc et des plastiques	2	5	2
286D	Fabrication d'outillage mécanique	1	4	0
322A	Fabrication d'équipements d'émission et de transmission hertzienne	3	4	9
266A	Fabrication d'éléments en béton pour la construction	1	3	0
243Z	Fabrication de peinture et vernis	1	2	0
295D	Fabrication de matériel de travaux publics	1	2	0
261C	Façonnage et transformation du verre plat	1	1	0
274M	Métallurgie des autres métaux non ferreux	1	0	6
361C	Fabrication de meubles de bureau et de magasin	1	0	10
900A	Collecte et traitement des eaux usées	1	0	1

en moyenne, supérieurs au seuil de $3 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$ recommandé par le ministère de l'Énergie aux États-Unis (2001) dans les secteurs utilisant du béryllium. Des taux de contamination surfacique de plusieurs centaines de microgrammes

de béryllium par décimètre carré ont été mesurés. 44,5 % des résultats dépassent le seuil de $0,2 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$ proposé au Québec (Dion et Perrault, 2003) comme objectif de diagnostic ; 30 % sont au-dessus du seuil de contamination de

FIGURE 1

Graphes des fréquences cumulées pour les résultats de prélèvements d'ambiance et individuels

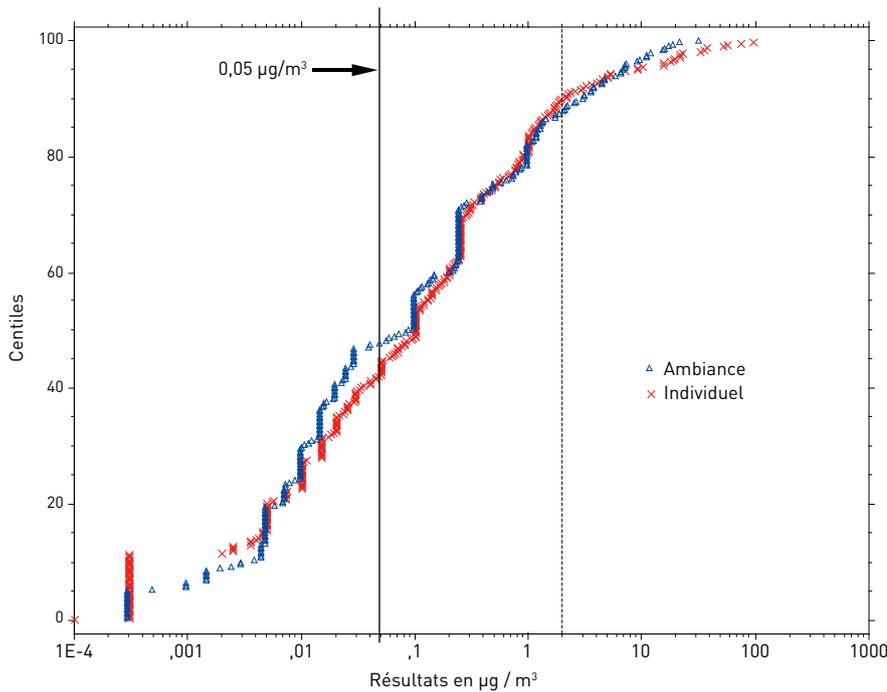


TABLEAU II

Statistiques descriptives des résultats des prélèvements atmosphériques (en $\mu\text{g m}^{-3}$) et surfaciques (en $\mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$)

Paramètres	Prélèvements atmosphériques				Prélèvements surfaciques
	Ambiance	Individuel	Représentatifs sur 8 heures	Représentatifs d'une tâche	
Nombre de résultats	278	354	453	112	554
Moyenne	1,21	2	2,137	0,27	11,78
Médiane	0,095	0,1	0,050	0,1	0,075
Moyenne géométrique	0,070	0,067	0,085	0,011	0,149
Etendue	0,001- 32,3	0,001-95,4	0,001-95,4	0,001-1	0,001-805
Centile 90	3,13	1,97	4	1	8,91

$1 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$ fixé par le Cardiff Atomic Weapons Establishment (Royaume Uni) (Johnson et al., 2001) ; 19 % sont au-dessus du seuil de $3 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$ proposé par le ministère de l'Énergie aux États-Unis. La synthèse des résultats des prélèvements atmosphériques et surfaciques par secteur d'activité est présentée dans le [Tableau III](#). En moyenne, les concentrations surfaciques les plus élevées correspondent aux secteurs suivants :

- métallurgie (moyenne géométrique : $0,962 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$) ;
- fabrication de meubles ; industries diverses (moyenne géométrique : $0,474 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$) ;
- fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie (moyenne géométrique : $0,426 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$).

Les concentrations atmosphériques moyennes les plus élevées concernent la métallurgie ($5,05 \mu\text{g m}^{-3}$) et la fabrication d'équipements de radio, télévision et communication ($2,41 \mu\text{g m}^{-3}$).

EXPOSITION ET NIVEAUX DE CONTAMINATION SURFACIQUE PAR SECTEURS D'ACTIVITÉ

Pour l'analyse de l'exposition par secteurs d'activité, par poste de travail et par métier, seuls les résultats des prélèvements individuels ou des prélèvements d'ambiance jugés représentatifs de l'exposition pendant la durée entière du poste de travail ont été retenus. Les informations sur le lieu de travail, le type d'exposition, etc. ont

été fournies pour chaque prélèvement en même temps que les observations des techniciens de laboratoire. A titre indicatif, les 453 résultats de cette série proviennent de prélèvements réalisés en moyenne pendant 5 heures. Pour cet ensemble de données d'exposition, il faut souligner que près de la moitié des résultats (47 %) étaient en deçà du seuil de détection. Les niveaux d'exposition calculés figurent dans le [Tableau IV](#). Excepté dans le secteur de la fabrication d'autres matériels de transport (NAF 35), les niveaux d'exposition dépassent très fréquemment la valeur de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ proposée par l'ACGIH en 2008. C'est notamment le cas dans la métallurgie, où plus de 75 % des résultats sont supérieurs à $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ et 40 % dépassent $2 \mu\text{g m}^{-3}$ (valeur limite recommandée en France). Les expositions à plusieurs dizaines de microgrammes par mètre cube sont également fréquentes dans ce secteur. En ce qui concerne le secteur d'activité 36, les prélèvements ont été effectués dans des ateliers de fabrication de bijoux et peuvent indiquer un niveau d'exposition élevé, avec une moyenne géométrique de $0,147 \mu\text{g m}^{-3}$ liée à l'utilisation de différents alliages contenant du béryllium.

En ce qui concerne le secteur de la métallurgie (cf. [Tableau V](#)), une analyse plus précise par activité montre que les expositions les plus importantes ont été mesurées dans des établissements de fonderie d'autres métaux non ferreux (NAF 27.5G), de première transformation du cuivre (NAF 27.4 K) et de fonderie d'acier (27.5C). Dans le secteur de la production d'aluminium, l'exposition professionnelle au béryllium est due essentiellement à la présence de traces de béryllium dans la bauxite. Les niveaux de contamination surfacique par le béryllium selon les secteurs d'activité, par rapport à différents seuils, figurent dans le [Tableau VI](#). Les résultats des prélèvements surfaciques indiquent des niveaux de contamination par le béryllium élevés dans la métallurgie : 35,7 % des résultats sont, en effet, supérieurs à la valeur limite de $3 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$ recommandée par le ministère de l'Énergie aux États-Unis. Des niveaux élevés ont également été observés dans le secteur « fabrication de meubles ; industries diverses », et notamment dans la fabrication de bijoux (NAF 36), où 31,2 % des expositions mesurées sont supérieures à $3 \mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$, et dans le secteur de la fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique, où 29 % des

TABLEAU III

Statistiques descriptives des résultats des prélèvements atmosphériques (en $\mu\text{g m}^{-3}$) et surfaciques (en $\mu\text{g 100 cm}^{-2}$) par secteurs d'activité

Branche d'activité	Prélèvements atmosphériques					Prélèvements surfaciques				
	Nb de résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue	Nb de résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue
Ensemble des branches	632	1,65	0,1	0,068	0,001-95,4	554	11,787	0,1	0,149	0,03-805
24 Industrie chimique	2	-	-	-	0,5-2,3	0	-	-	-	-
26 Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques	4	0,81	1	0,707	0,25-1	0	-	-	-	-
27 Métallurgie	172	5,05	0,67	0,517	0,005-95,4	61	31,198	1,68	0,962	0,05-805
28 Travail des métaux	101	0,23	0,015	0,028	0,001-4,86	263	5,2	0,05	0,061	0,003-688
29 Fabrication de machines et d'équipements	13	0,27	0,25	0,162	0,013-0,8	20	1,018	0,005	0,021	0,005-19,2
32 Fabrication d'équipements de radio, télévision et communication	35	2,41	0,069	0,153	0,004-19,2	36	0,779	0,1	0,155	0,011-5,9
33 Fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	86	0,16	0,03	0,03	0,001-2,23	139	20,017	0,598	0,426	0,001-660
35 Fabrication d'autres matériels de transport	16	0,007	0,005	0,007	0,005-0,015	0	-	-	-	-
36 Fabrication de meubles ; industries diverses	30	0,43	0,23	0,135	0,005-2,19	20	21,18	0,163	0,474	0,01-228
37 Récupération	122	0,22	0,1	0,013	0,001-1	0	-	-	-	-
45 Construction	9	0,5	0,3	0,352	0,1-1	0	-	-	-	-
51 Commerce de gros et intermédiaires du commerce	42	0,06	0,02	0,024	0,004-0,96	14	0,232	0,27	0,053	0,015-1,44
90 Assainissement, voirie et gestion des déchets	0	-	-	-	-	1	19	-	-	-

TABLEAU IV

Niveaux d'exposition professionnelle au béryllium (en $\mu\text{g m}^{-3}$) par secteurs d'activité

Branche d'activité	Nb résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue	Centiles		
						25	75	90
Ensemble des branches	453	2,13	0,05	0,085	0,001-95,4	0,012	0,43	4
24 Industrie chimique	2	-	-	-	0,5-2,3	-	-	-
27 Métallurgie	159	5,37	0,42	0,494	0,005-95,4	0,06	4,15	16,06
28 Travail des métaux	76	0,18	0,015	0,023	0,001-1,84	0,007	0,11	0,6
29 Fabrication de machines et d'équipements	3	-	-	-	0,013-0,41	-	-	-
32 Fabrication d'équipements de radio, télévision et communication	29	2,4	0,01	0,036	0,004-19,24	0,004	1,04	10,44
33 Fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	74	0,16	0,03	0,032	0,001-2,23	0,005	0,14	0,5
35 Fabrication d'autres matériels de transport	14	0,008	0,005	0,007	0,005-0,15	0,005	0,01	0,015
36 Fabrication de meubles ; industries diverses	26	0,46	0,23	0,147	0,005-2,19	0,058	0,58	1,52
37 Récupération	30	0,054	0,036	0,046	0,019-0,1	0,029	0,1	0,1
51 Commerce de gros et intermédiaires du commerce	40	0,067	0,02	0,021	0,004-0,96	0,015	0,077	0,13

TABLEAU V

Niveaux d'exposition au béryllium (en $\mu\text{g m}^{-3}$) pour les différentes activités de la métallurgie

Activité	Nb résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue	Centiles		
						25	75	90
Ensemble des activités	158	5,4	0,45	0,506	0,05-95,4	0,06	4,21	16,1
27.4C Production d'aluminium	32	0,39	0,19	0,147	0,05-2,53	0,05	0,55	0,95
27.4K Première transformation du cuivre	13	2,53	1,9	0,968	0,005-7	1,17	3,62	5,56
27.5C Fonderie d'acier	53	3,44	0,1	0,238	0,005-51,9	0,05	1,31	7,72
27.5E Fonderie de métaux légers	12	0,017	0,015	0,016	0,01-0,03	0,015	0,018	0,023
27.5G Fonderie d'autres métaux non ferreux	48	13,02	6,69	5,249	0,062-95,4	2,93	16	29,36

TABLEAU VI

Concentration surfacique en béryllium (en $\mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$) par branche d'activité

Activité	Nb échantillons	pourcentage d'échantillons par catégories de concentrations ($\mu\text{g } 100 \text{ cm}^{-2}$)			
		< LOQ*	LOQ $\leq x \leq 0,2$	0,2 < x $\leq 3,0$	> 3,0
Ensemble des activités	554	21,1	37,6	25	16,3
27 Métallurgie	61	12,3	21	31	35,7
28 Travail des métaux	263	39,1	36,1	18	6,8
29 Fabrication de machines et d'équipements	20	40	44,1	11,3	4,6
32 Fabrication d'équipements de radio, télévision et communication	36	41,6	24,9	24,9	8,6
33 Fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	139	7,9	30,7	32,4	29
36 Fabrication de meubles ; industries diverses	20	15	37,6	16,2	31,2
51 Commerce de gros et intermédiaires du commerce	14	42,8	34,9	22,3	0
90 Assainissement, voirie et gestion des déchets	1 (1,9)	-	-	-	-

*LOQ : Limite de Quantification

TABLEAU VII

Niveaux d'exposition au béryllium (en $\mu\text{g m}^{-3}$) par type de poste de travail

Activité	Nb résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue	Centiles		
						25	75	90
Travaux en fonderie	111	7,57	2,1	1,127	0,004-95,4	0,1	7,23	21,7
Usinage	98	0,23	0,014	0,022	0,001-9,1	0,007	0,05	0,45
Traitement de surface	82	0,74	0,100	0,100	0,004-19,2	0,025	0,38	1,35
Soudage	39	0,21	0,025	0,046	0,004-2,23	0,015	0,2	0,58
Démantèlement de déchets électriques	23	0,028	0,03	0,017	0,004-0,038	0,025	0,036	0,037
Postes divers	100	0,36	0,02	0,027	0,001-19	0,005	0,1	0,35

résultats sont au-dessus de la limite de détection. Excepté dans ce dernier secteur d'activité, on a tendance à observer l'existence d'un lien entre les niveaux d'exposition au béryllium et les niveaux de contamination surfacique ; en général, plus les niveaux d'exposition sont élevés, plus les niveaux de contamination surfacique sont élevés.

EXPOSITION PAR TYPE DE POSTE DE TRAVAIL

Lors de cette étude, les principaux postes de travail contrôlés appartenaient aux catégories suivantes :

- Travaux d'usinage (fraisage, tournage, etc.) ;

- Traitement de surface (polissage, ponçage, etc.) ;

- Travaux en fonderie (coulée de métal, noyautage, etc.) ;

- Soudage par différents procédés (essentiellement à l'arc) ;

- Démantèlement manuel de déchets électriques, etc.

Les autres postes de travail étaient très variés et impliquaient des tâches telles que le broyage, le stockage, etc.

Les niveaux d'exposition par type de poste de travail figurent dans le [Tableau VII](#). Les expositions les plus importantes correspondent à différents

TABLEAU VIII

Niveaux d'exposition au béryllium (en $\mu\text{g m}^{-3}$) par type de profession

Activité	Nb résultats	Moyenne	Médiane	Moyenne géométrique	Étendue	Centiles		
						25	75	90
Agent/agente d'entretien et d'assainissement	2	0,004	-	-	-			
Prothésiste dentaire	27	0,1	0,045	0,056	0,005-0,54	0,03	0,045	0,123
Conducteur d'engins de levage	7	0,009	0,010	0,008	0,005-0,015	0,005	0,010	0,014
Soudeur	143	0,239	0,017	0,028	0,01-9,1	0,007	0,108	0,710
Opérateur sur machines automatiques en production électrique et électronique	18	2,08	0,004	0,015	0,001-19,2	0,002	0,029	9,399
Conducteur de cuve d'électrolyse	44	0,37	0,13	0,148	0,005-2,5	0,100	0,411	0,906
Opérateur de production des métaux	90	4,11	0,17	0,373	0,004-56,4	0,05	2,82	10,645
Agent de traitements dépolluants	27	0,19	0,025	0,043	0,004-1,95	0,020	0,057	0,586
Conducteur de machines d'impression	5	4,56	0,74	0,336	0,01-19	0,010	7,045	19
Opérateur de sciage débit	13	0,03	0,005	0,007	0,001-0,24	0,004	0,013	0,087
Fondeur	58	8,23	1,62	0,882	0,005-95,4	0,081	7,36	20,86
Agent d'encadrement de la construction mécanique	2	0,013	-	-	0,01-0,015	-	-	-
Technicien de fabrication de la construction mécanique et du travail des métaux	4	0,004	0,004	0,004	0,004-0,005	0,004	0,005	-
Cadre technique de la production	1	1,1	-	-	-	-	-	-
Non renseigné	12	0,03	0,03	0,029	0,015-0,038	0,028	0,037	0,037

travaux de fusion et de coulée de métal en fonderie. Pour ce type de poste de travail, où l'exposition moyenne géométrique est de $1,127 \mu\text{g m}^{-3}$, 90 % des résultats dépassent la valeur de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$. Les postes correspondant à des travaux de traitement de surface (polissage, ponçage, etc.) présentent également des expositions importantes avec environ 60 % des résultats supérieurs à $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ et une exposition moyenne géométrique de $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$.

PROFESSIONS EXPOSÉES

Les informations enregistrées dans la base de données COLCHIC permettent de caractériser l'exposition en fonction de la profession des salariés ayant fait l'objet de mesures d'exposition professionnelle aux agents chimiques. Pour chaque mesure, le métier correspondant à l'emploi occupé par le salarié est codifié en référence au Répertoire opérationnel des métiers et des emplois (ROME) de l'Agence nationale pour l'emploi (ANPE).

Les 15 métiers identifiés lors de l'étude et les niveaux d'exposition correspondants sont présentés dans le [Tableau VIII](#). Le métier le plus fréquemment contrôlé est celui de soudeur avec une exposition moyenne géométrique de

$0,028 \mu\text{g m}^{-3}$. Les professions les plus exposées sont les suivantes :

- Fondeur (médiane : $1,62 \mu\text{g m}^{-3}$) ;
- Conducteur de machine d'impression (médiane : $0,74 \mu\text{g m}^{-3}$) ;
- Opérateur de production des métaux (médiane : $0,17 \mu\text{g m}^{-3}$) ;
- Conducteur de cuve d'électrolyse ($0,13 \mu\text{g m}^{-3}$).

Pour les autres professions, l'exposition médiane est beaucoup plus faible, mais des niveaux d'exposition pouvant atteindre jusqu'à plusieurs $\mu\text{g m}^{-3}$ sont fréquemment mesurés. Seules les professions de conducteur d'engins de levage (centile 90 = $0,014 \mu\text{g m}^{-3}$) et de technicien de fabrication de la construction mécanique semblent être exposées à des niveaux inférieurs à $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ (valeur limite recommandée par l'ACGIH, 2008).

Les fondeurs sont exposés à des fumées et à des poussières contenant du béryllium lors de la fonte de différents alliages tels que le cupro-béryllium, l'aluminium-béryllium, le laiton, le bronze, l'acier, etc. pour la fabrication de pièces mécaniques, de bijoux, d'objets d'art, etc.

L'exposition élevée mesurée pour la profession de conducteur de machines d'impression correspond à des travaux

d'impression par sérigraphie à l'aide d'encre conductrices sur des plaques de céramique en oxyde de béryllium, dans une unité de fabrication de condensateurs. Compte tenu du faible nombre de mesures, cette situation ne peut probablement pas être généralisée pour l'ensemble de cette profession.

D'une manière générale l'analyse des expositions par secteur d'activité, puis par type de poste est de nouveau corroborée par cette évaluation de l'exposition par profession.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude menée sur un échantillon ciblé d'établissements montrent que les concentrations atmosphériques de béryllium et les mesures d'exposition au béryllium réalisées dépassent la valeur limite de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ proposée par l'ACGIH depuis 2008 et celle de $2 \mu\text{g m}^{-3}$ recommandée en France : 15 % des mesures d'exposition réalisées dans le cadre de cette étude dépassaient la valeur de $2 \mu\text{g m}^{-3}$. Les expositions liées aux activités nécessitant la mise en œuvre d'alliages à chaud dans les fonderies et l'électrometallurgie (pro-

duction d'aluminium) étaient importantes (NAF 27). Dans le secteur du travail des métaux (NAF 28), employant un plus grand nombre de salariés potentiellement exposés, les niveaux d'exposition sont plus faibles, mais environ 30 % des expositions mesurées dépassent la valeur limite recommandée par l'ACGIH depuis 2008.

Les métiers de la fonderie et assimilés sont les plus exposés. Dans le secteur de l'électronique, les métiers de l'impression peuvent également être très exposés lors de la mise en œuvre de supports à base d'oxyde de béryllium. Les mesures surfaciques ont également mis en évidence des niveaux de contamination élevés par rapport aux différentes valeurs actuellement proposées en hygiène industrielle. De plus, il faut souligner la co-exposition à d'autres métaux toxiques tels que le plomb, le cobalt, le nickel, etc. dans de nombreuses industries métallurgiques.

Les niveaux de contamination surfacique mesurés durant cette étude sont comparables à ceux observés lors d'autres études (Day et al., 2007 ; Sanderson et al., 2008) démontrant l'existence d'une forte corrélation entre les concentrations atmosphériques de béryllium et les niveaux de contamination surfacique.

Cette étude a permis de caractériser les secteurs à risque élevé. Compte tenu de la toxicité du béryllium, des actions spécifiques sont à envisager pour réduire les expositions.

En France, la valeur limite d'exposition professionnelle au béryllium et à ses composés est en cours de révision. Il est très probable que la nouvelle VLEP réglementaire qui sera adoptée sera proche de la valeur limite de $0,05 \mu\text{g m}^{-3}$ proposée par l'ACGIH depuis 2008.

En matière de prévention technique, la mise en place de systèmes de ventilation générale et de ventilation locale par aspiration à la source, et de systèmes de décontamination des lieux de travail selon des procédures adaptées, semble nécessaire. Compte tenu des différentes voies d'exposition pouvant entraîner une sensibilisation, l'exposition cutanée au béryllium et aux particules fines pourrait être réduite grâce à l'emploi de gants de protection adaptés. En France, le béryllium est un agent chimique classé cancérigène de catégorie 2 : substances devant être assimilées à des substances cancérigènes pour l'homme. A ce titre, il relève d'une réglementation spécifique et doit être substitué lorsque cela est techniquement possible. Les efforts de substitution ont abouti dans certains secteurs : alliages pour prothèses dentaires (AFNOR, 2007), alliages pour blindages de circuits électroniques et d'optiques spatiales (MRS, 2004).

Toutefois, la substitution peut ne pas suffire pour éviter l'exposition des travailleurs au béryllium, et certaines activités telles que le recyclage de déchets électriques, notamment les opérations de fusion des circuits imprimés ou des composants électroniques susceptibles de contenir du béryllium ou certains de

ses composés, doivent faire l'objet d'une évaluation rigoureuse.

En raison de la cancérogénicité du béryllium et de son caractère sensibilisant, une surveillance médicale particulière des travailleurs devrait être mise en place dans tous les secteurs d'activité utilisant du béryllium quelle que soit sa forme chimique : métal, sel, oxyde, etc.

Ce sont probablement les postes de travail et les métiers du secteur de la métallurgie qui comptent le plus de travailleurs exposés. A noter qu'il n'existe pas de consensus sur le contenu de cette surveillance médicale, la Société française de médecine du travail examine la question afin de formuler prochainement des recommandations sur le suivi médical des salariés exposés et ayant été exposés au béryllium.

L'évaluation de l'exposition par métrologie atmosphérique dans ce secteur pourrait être complétée une biométrie.

Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement les laboratoires de chimie des caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) pour leur participation aux étapes de prélèvements et d'analyse de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] AFNOR. (2007) NF EN ISO 22674. Art dentaire. Matériaux métalliques pour les restaurations fixes et amovibles et les appareillages. AFNOR ; 32 p.
- [2] American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). (2008) Documentation of the TLVs® and BEIs® with other worldwide occupational exposure values-2008. AFNOR: CD-ROM.
- [3] ASTM. (2002) norme E1792-03. Standard specification for wipe sampling materials for lead in surface dust. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [4] ASTM. (2003) D6966-03. Standard practice for collection of settled dust samples using wipe sampling methods for subsequent determination of metals. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [5] DAY GA, DUFRESNE A, STEFANIAK AB et al. (2007) Exposure pathway assessment at a copper-beryllium alloy facility. *Ann Occup Hyg*; 51: 67-80. Day GA, Stefaniak AB, Weston A et al. (2005) Beryllium exposure: dermal and immunological considerations. *Int Arch Occup Environ Health*; 79: 161-4.
- [6] DION C, PERRAULT G. (2003) Summary of good cleanup and decontamination practices for workplaces with Beryllium containing dust. http://www.irsst.qc.ca/fr/_publicationirsst_100113.html. Consulté le 12 août 2008.
- [7] European chemical Substances Information System (ESIS). (2008) <http://ecb.jrc.it/esis/>. Consulté le 12 août 2008.
- [8] HENNEBERGER PK, GOE SK, MILLER WE et al. (2004) Industries in the United States with airborne beryllium exposure and estimates of the number of current workers potentially exposed. *J Occup Environ Hyg*; 1: 648-59.
- [9] INRS. (2007) Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. <http://www.inrs.fr>. Consulté le 12 juin 2008.
- [10] INRS. (2008) Métaux-Métalloïdes. Fiche Métropol 003. <http://www.inrs.fr/>. Consulté le 12 juin 2008.
- [11] Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE). (2003) Nomenclature des activités Françaises, NAF rév. 1, 2003. <http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=5/nomenclatures/naf2003/naf2003.htm>. Consulté le 12 août 2008.
- [12] Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). (1993) Monographs. Beryllium [7440-41-7] and beryllium compounds. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol58/volume58.pdf>. Consulté le 12 août 2008.
- [13] JOHNSON JS, FOOTE K, MCCLEAN M et al. (2001) Beryllium exposure control program at the Cardiff atomic weapons establishment in the United Kingdom. *Appl Occup Environ Hyg*; 16: 619-30.
- [14] KREISS K, DAY GA, SCHULER CR. (2007) Beryllium: a modern industrial hazard. *Ann Rev Public Health*; 28: <http://ssrn.com/abstract=1077892>. Consulté le 12 août 2008.
- [15] Material Research Society. (2004) Silicon carbides replace beryllium for airborne and space-based optics. *MRS Bull*; 29: 914.
- [16] NEWMAN LS, MROZ MM, BALKISSOON R et al. (2005) Beryllium sensitisation progresses to chronic beryllium disease. *Am J Respir Crit Care Med*; 171: 54-60.
- [17] NIOSH. (2003) Method 9102: elements on wipes. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM). 4e éd. <http://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdfs/9102.pdf>. Consulté le 12 juin 2008.
- [18] OSHA. (2002) Method ID 125G: metal and metalloid particulates in workplace atmospheres (ICP Analysis). <http://www.osha.gov/dts/sltc/methods/inorganic/id125g/id125g.html>. Consulté le 12 juin 2008.
- [19] PELTIER A, ELCABACHE JM, GUILLEMIN C et al. (1994) Pollution dans les ateliers de fabrication de bijoux. INRS, Hygiène et Sécurité du Travail, Cahiers de Notes Documentaires, ND 1971. <http://www.inrs.fr>. Consulté le 12 juin 2008.
- [20] PELTIER A, GUILLEMIN C, ELCABACHE JM et al. (1997) Evaluation de l'exposition professionnelle au béryllium dans des entreprises utilisatrices d'alliages cuivre-béryllium. INRS, Hygiène et Sécurité du Travail, Cahiers de Notes Documentaires, ND 2056. <http://www.inrs.fr>. Consulté le 12 juin 2008.
- [21] PELTIER A, KAUFFER E, MOULUT JC et al. (1991) Pollution dans les ateliers de prothèse dentaire. INRS, Hygiène et Sécurité du Travail, Cahiers de Notes Documentaires, ND 1830. <http://www.inrs.fr>. Consulté le 12 juin 2008.
- [22] SANDERSON WT, LEONARD S, OTT D et al. (2008) Beryllium surface levels in a military ammunition plant. *J Occup Environ Hyg*; 5: 475-81.
- [23] STANGE AW, FURMAN FJ, HILMAS DE. (2004) The beryllium lymphocyte proliferation test: relevant issues in beryllium health surveillance. *Am J Ind Med*; 46: 453-62.
- [24] STEFANIAK AB, HOOVER MD, DAY GA et al. (2004) Characterization of physicochemical properties of beryllium aerosols associated with prevalence of chronic beryllium disease. *J Environ Monit*; 6: 523-32.
- [25] STEFANIAK AB, HOOVER MD, DICKERSON RM et al. (2003) Surface area of respirable beryllium metal, oxide, and copper alloy aerosols and implication for assessment of exposure risk of chronic beryllium disease. *Am Ind Hyg Assoc J*; 64:297-305.
- [26] THORAT DD, MAHADEVAN TN, GHOSH DK. (2003) Particle size distribution and respiratory estimates of beryllium aerosols in an extraction and processing plant. *Am Ind Hyg Assoc J*; 64:522-7.
- [27] TINKLE SS, ANTONINI JM, RICH BA et al. (2003) Skin as route of exposure and sensitization in chronic beryllium disease. *Environ Health Perspect*; 111: 1202-8.
- [28] Ministère de l'Énergie des États-Unis. (2001) G 440.1-7.A. Implementation guide for use with 10 CFR Part 850, chronic beryllium disease prevention program. <http://www.hss.energy.gov/HealthSafety/WSHP/be/guide/beguide/beguide.html>. Consulté le 12 août 2008.
- [29] VINCENT R, JEANDEL B. (2001) COLCHIC, occupational exposure to chemical agents database: current content and development perspectives. *Appl Occup Environ Hyg*; 16:115-21.
- [30] VINCENT R, KAUPPINEN T, TOIKKANEN J et al. (1999) CAREX, Système international d'information sur l'exposition professionnelle aux cancérigènes en Europe ; Résultats des estimations pour la France pendant les années 1990-1993. INRS, Hygiène et Sécurité du Travail - Cahiers de Notes Documentaires, 176, 1999, ND 2113.