

Les effets sur la santé de l'exposition aux vapeurs de mercure chez les orpailleurs, les raffineurs/commerçants d'or et les populations vivant à proximité

INTRODUCTION

La plupart des régions amazoniennes ont connu dès le début des années 1980 une véritable ruée vers l'or, résultat conjugué d'une augmentation du prix de l'or et de l'aggravation d'une situation sociale et économique précaire. Ainsi, au cours de ces deux dernières décennies, les activités d'orpaillage se sont étendues à l'ensemble des régions amazoniennes. Différents types d'exploitation minière se sont développés, se distinguant les uns des autres par leur taille (petite, moyenne et grande) et leur degré de légalité (informel, légal et illégal).

L'orpaillage est apparu comme une planche de salut pour une grande partie de la population se trouvant en situation de survie. Ainsi, le petit mineur s'est engagé dans cette activité, poussé par la nécessité de nourrir sa famille et payer ses dettes. D'où la multiplication rapide de petites exploitations à caractère artisanal et informel, gérées par des orpailleurs néophytes, dépourvus d'expérience et de moyens financiers. Ces derniers ont été inévitablement conduits à employer des procédés très rudimentaires pour extraire l'or de sites déjà exploités par le passé ou encore de sites nouveaux. La méthode d'enrichissement du minerai aurifère par le mercure, en raison de son faible coût, de son efficacité et des facilités opérationnelles qu'elle offre, s'est révélée comme la plus appropriée dans ce contexte socio-économique particulier et s'est imposée un peu partout, y compris dans les exploitations de grande taille (MALM, 1998 ; VEIGA, 1997 ; LACERDA, 1995).

EXPOSITION DES GROUPES À HAUT RISQUE

Dans le secteur minier artisanal, l'exposition professionnelle provient principalement de l'inhalation de vapeurs de mercure, Hg^0 . Les orpailleurs, les raffineurs et les bijoutiers sont les plus directement touchés. L'importance de l'exposition dépend d'une part des méthodes utilisées pour amalgamer le minerai aurifère, l'enrichir et le purifier, d'autre part des équipements de protection employés et de leur bon usage. D'une façon générale, on opère sans guère se soucier des dangers que représentent les émanations de Hg.

Les vapeurs de mercure sont également absorbées par la peau, mais en bien moindre proportion. La quantité pénétrant ainsi par voie cutanée est estimée à 2,6 % de celle provenant de la respiration de l'air contaminé. Une application directe de mercure sur la peau doit causer très probablement des absorptions bien supérieures (BELLES, 1994).

Les populations vivant au voisinage des sources d'émission sont également exposées dans la mesure où elles respirent un air enrichi en vapeurs de mercure (LACERDA, 1995). Approximativement, 80 % des vapeurs inhalées passent dans l'organisme (IPCS, 1991).

Après inhalation, le Hg^0 absorbé est rapidement transformé dans le sang sous la forme de mercure ionisé, Hg^{2+} . Il est ensuite véhiculé vers le cerveau et d'autres tissus du système nerveux, puis finalement excrété en grande partie dans les urines (EPA, 1997 ; IPCS, 1991).

Trois formes d'exposition sont généralement identifiées, selon la durée et l'intensité des émissions : aiguë, chronique et aiguë-chronique. Elles touchent de façon inégale les trois grands groupes socio-démographiques concernés : les orpailleurs dans les sites miniers, les employés des entreprises spécialisées dans la purification de l'or et sa commercialisation (dénommées « *casas de ouro* » au Brésil, c'est-à-dire « maisons d'or »), enfin les populations proches des sources de vapeurs de mercure.

LES ORPAILLEURS

Les différentes formes d'orpaillage vont de l'usage manuel de la batée par le chercheur d'or individuel à l'emploi de moyens mécanisés dans les moyennes et grandes entreprises (dragues dans les lits de rivière, pelles mécaniques en terre

ferme). Mais, quel que soit le type d'exploitation, l'usage du mercure est identique. Il comprend deux phases bien distinctes. La première phase correspond à l'enrichissement du minerai par formation d'un amalgame or-mercure après adjonction de mercure élémentaire, Hg^0 . La seconde phase comprend l'élimination de l'excédent de mercure (une presse manuelle est souvent utilisée à cet effet) puis la purification de l'amalgame formé par un traitement à chaud provoquant la vaporisation de Hg^0 (VEIGA, 1997 ; LACERDA, 1991 ; DE KOM, 1998 a).

Les quantités de mercure utilisées et les fractions perdues sont très variables. Elles dépendent de la forme d'extraction du minerai aurifère et des procédés retenus pour l'amalgamer et ensuite se débarrasser du mercure (VEIGA, 1997). Les protocoles opérationnels diffèrent selon la taille de l'exploitation (voir annexe 13). Pour le Brésil, une estimation moyenne des pertes de mercure au cours des phases qui viennent d'être décrites a été faite par VEIGA (1997) : 20 % sont perdus en fin d'amalgamation, 70 % se volatilisent lors de la destruction de l'amalgame (en l'absence de retorte) et les 10 % restants partent en vapeurs lors de l'ultime purification dans les maisons de vente de l'or. À ces émissions, il faut ajouter les opérations, certes de moindre importance, qui accompagnent toute manipulation de ce métal à température ambiante, en dehors des phases de purification.

L'exposition est maximale chez ceux qui accomplissent des tâches les exposant directement aux émissions de vapeurs de mercure ; elle est plus réduite chez ceux qui se trouvent à proximité de ces sources d'émission. Les ouvriers directement exposés aux vapeurs de mercure lors de la destruction de l'amalgame souffrent d'une seconde exposition qui provient de la manipulation à main nue du mercure au cours des différentes phases de concentration et de purification de l'or.

Dans les grandes entreprises, il existe une différenciation poussée du travail et les ouvriers sont inégalement exposés. Dans une étude réalisée au Surinam, sur une population de 77 individus, trois groupes de travailleurs ont été identifiés en fonction de leur labeur : 8 % sont des agents de la logistique (cuisiniers, mécaniciens, gardiens...), 18 % des cadres dirigeants (contremaîtres, propriétaires et concessionnaires) et 74 % des mineurs. Dans ce dernier groupe sont distingués ceux qui procèdent aux travaux de terrassement à l'aide soit d'engins mécaniques, soit de lances à jet d'eau sous pression, ceux qui débroussaillent les sites, enlevant les pierres et les racines, et enfin ceux qui préparent l'amalgame or-mercure et le brûlent (De Kom, 1998 b).

Dans le cadre de ces activités minières, l'hygiène tient peu de place. Le plus souvent, pas la moindre mesure préventive n'est prise pour éviter l'exposition au mercure (DE KOM, 1998 b) et, lorsque des mesures existent, les systèmes de protection sont dans la plupart des cas défectueux et peu efficaces. Ils vont du simple usage de feuilles d'arbre (assurant par la même occasion le recyclage du mercure) à celui de retortes, en passant par l'emploi de masques à poussière, de mouchoirs, de troncs d'arbre creux, de cylindres surmontés d'une cheminée, ou encore le travail à distance. Les retortes, qui assurent la meilleure protection et le meilleur recyclage du mercure, ne sont pas souvent utilisées (DE KOM, 1998 b). Cela s'explique parfois par l'ignorance fréquente concernant la toxicité du mercure, mais aussi par le coût d'achat trop élevé de tels équipements pour les petits groupes d'orpailleurs. Cette constatation ne se limite pas au Surinam. LACERDA (1991) observe une situation semblable au Brésil, toujours pour les mêmes raisons.

Les travailleurs passent des périodes très variables sur les sites miniers, allant de quelques semaines à plusieurs mois. Les chantiers sont souvent très proches les uns des autres de sorte que les ouvriers sont exposés aux vapeurs de mercure du proche voisinage. Autre fait aggravant, l'ensemble des travailleurs assistent à l'opération de destruction à chaud de l'amalgame qui représente le fruit de leur labeur. Nombreux sont également ceux qui, en plus de leurs tâches normales, occupent leur temps libre à orpiller à titre individuel, à la recherche de quelques gains supplémentaires (DE KOM, 1998 a et b). Bien qu'ils occupent différentes fonctions et qu'ils soient inégalement exposés au mercure, tous courent des risques de contamination.

Au Surinam, l'activité minière est avant tout une affaire d'hommes, comme d'ailleurs dans d'autres pays d'Amérique du Sud. Toutefois, au Brésil, il y a des exemples de femmes travaillant dans les sites d'orpaillage de taille moyenne. Elles pratiquent la batée pour apporter une aide financière à leur famille mais elles travaillent rarement avec leur partenaire masculin. En Colombie, il est courant de rencontrer des femmes enrichissant du minerai aurifère dans l'arrière-cour de leur maison (VEIGA, 1997).

RAFFINEURS, ACHETEURS/VENDEURS ET JOAILLIERS

Les lingots d'or qui viennent des mines sont fondus dans les « maisons d'or » sous le contrôle du propriétaire. Ces opérations sont réalisées dans des

pièces plus ou moins confinées, dépourvues d'une bonne circulation de l'air. Les concentrations de vapeurs de mercure y atteignent des valeurs très élevées. Le personnel qui assure les diverses tâches administratives et commerciales est autant exposé aux vapeurs que celui qui est directement chargé de la purification (VEIGA, 1997 ; LACERDA, 1995).

Les joailliers, qui manipulent avec une certaine continuité de l'or non raffiné, représentent un autre groupe sujet au risque de contamination chronique (DE KOM, 1998 b).

LA POPULATION VIVANT À PROXIMITÉ

Les familles, femmes et enfants, des travailleurs qui vivent près des sites miniers n'échappent pas aux vapeurs de mercure provenant des opérations de concentration du minerai en or ni à celles issues du mercure souillant les vêtements des travailleurs. Pour les femmes enceintes se présente en outre le risque de contamination du fœtus par voie placentaire.

Les familles des raffineurs d'or et celles des joailliers sont également des groupes à haut risque. Les émissions de Hg^0 qui proviennent de ces maisons de commerce de l'or représentent un véritable danger pour la population urbaine vivant à proximité, surtout lorsqu'il n'existe pas de mesures préventives, telles que l'usage de hottes munies de condenseurs, ou encore lorsqu'il est fait usage d'équipements défectueux. La plus grande partie du Hg^0 émis par les fondeurs de lingots retombe près de la source émettrice, c'est-à-dire à moins de 1 km (VEIGA, 1997).

Ainsi, ces diverses familles vivant les unes proches des chantiers miniers, les autres à proximité des « maison d'or » sont sujettes à une contamination chronique. Ces maisons restent contaminées longtemps après la cessation des activités de raffinage de sorte qu'elles continuent d'être un danger pour les personnes qui viennent les habiter.

LES INDICATEURS D'EXPOSITION

LES BIO-INDICATEURS

Pour mesurer l'exposition humaine au mercure métallique, différents moyens peuvent être utilisés. Le moyen le plus courant pour effectuer la sur-

veillance biologique est d'analyser le sang et les urines. Quelques mesures ont été faites sur le plasma, le sérum et les érythrocytes. La détermination de mercure métallique dans d'autres milieux n'est pas habituelle.

Le mercure dans le sang est un excellent indicateur de contaminations récentes. Si l'indicateur est une mesure du mercure total (somme du mercure inorganique et du mercure méthylé), il ne faut pas oublier qu'une part du mercure peut résulter d'une contamination au méthylmercure (MeHg) provenant de poissons eux-mêmes contaminés. Un moyen de résoudre ce problème est de compléter la mesure du mercure total par une seconde mesure spécifique du mercure métallique. Toutefois, l'interférence venant du MeHg n'est pas importante quand l'analyse porte sur l'urine. Près de 90 % du MeHg total est excrété par voie fécale (BERLIN, 1986 ; IPCS, 1991). L'urine est donc la matière de choix pour des surveillances sanitaires à long terme en ce qui concerne l'exposition aux vapeurs de mercure.

L'exposition professionnelle est de préférence testée sur un prélèvement de la première urine du matin. Sa mesure est ensuite corrigée par rapport à la teneur en créatinine. La méthode de référence qui est utilisée pour mesurer le mercure dans le sang et les urines est la fluorescence atomique à vapeurs froides de mercure. L'interprétation des résultats n'est aisée que lorsqu'il s'agit d'une exposition récente et n'ayant pas été marquée par des variations temporelles importantes et déterminées sur un groupe de sujet.

Des tentatives pour établir une corrélation entre les teneurs en mercure dans le sang et dans les urines ont été faites dans plusieurs études. Les résultats sont très variables. Il n'est pas possible d'affirmer que le rapport entre le mercure dans le sang et celui dans l'urine est constant à différents niveaux d'imprégnation (IPCS, 1991).

LES ÉCHANTILLONS D'AIR

La surveillance des niveaux de mercure auxquels les travailleurs sont exposés est faite à partir de mesures de mercure. L'échantillonnage de l'air pour les analyses de mercure peut être réalisé par des échantillonneurs automatiques à poste fixe ou bien par des prélèvements manuels. Ce dernier mode de prélèvement est préférable (IPCS, 1991).

Chez les employés des industries qui font usage du mercure, une bonne relation est souvent obtenue entre le temps d'exposition journalier et le taux jour-

nalier de mercure dans le sang et les urines (ROELS, 1987). Dans les urines, des teneurs en mercure d'environ 50 µg/g de créatinine ont été observées après une exposition professionnelle à 40 µg de Hg par mètre cube d'air. On estime qu'une telle exposition conduit à une teneur en Hg dans le sang égale à 17 µg/l.

RÉSULTATS DES ÉTUDES

Ces dernières années, plusieurs études de surveillance ont été réalisées en Amazonie sur les mineurs exposés et les employés des maisons d'achat et de vente de l'or.

Le tableau I regroupe des données sur les niveaux de mercure rencontrés dans les urines et le sang. Ces données montrent que les niveaux de Hg dans les urines et le sang sont nettement supérieurs aux niveaux de base attendus. Elles présentent aussi une grande variabilité, indiquant par là des profils d'exposition pouvant être très différents d'un individu à un autre. Peu d'études ont signalé l'apparition de symptômes d'intoxication mercurielle. En se fondant sur les teneurs en Hg dans les urines, certains orpailleurs, raffineurs, acheteurs/vendeurs et joailliers ont dû connaître les premiers effets subtils de l'empoisonnement mercuriel pour des concentrations de Hg dans les urines comprises entre 30 et 100 µg/g de créatinine, d'autres les classiques signes cliniques d'empoisonnement pour des concentrations supérieures à 100 µg/g de créatinine. Quoi qu'il en soit, les diagnostics ne sont pas aisés à établir car les symptômes d'empoisonnement au Hg peuvent être masqués par d'autres maladies chez des populations souffrant généralement de bien d'autres troubles de santé. Les symptômes sont souvent confondus avec ceux provenant du paludisme, de l'alcoolisme ou encore d'autres maladies tropicales (LACERDA, 1995 ; VEIGA, 1997).

Les études confirment que les émissions de Hg les plus importantes proviennent du brûlage de l'amalgame Au-Hg. De très fortes concentrations de Hg se trouvent dans l'air à cette occasion. Ces opérations d'enrichissement du mercure dans les mines sont relativement espacées dans le temps, mais elles sont aisément identifiées par un pic de concentration de mercure dans l'air environnant. Les valeurs varient en fonction des quantités d'or extraites (MALM, 1998).

Le tableau II fournit des données sur la contamination dans les atmosphères fermées des maisons de vente/achat de l'or et de l'environnement immédiat dans les villes et villages, occasionnée par la purification des lingots d'or.

Tableau I. Etudes portant sur les concentrations de mercure dans le sang et l'urine.

Sujets	Symptômes	Localisation	Exposition aux vapeurs de Hg	n	Sang ($\mu\text{g/l}$) moyenne $\pm \sigma$; intervalle	Urine ($\mu\text{g/g}$ créatinine) moyenne $\pm \sigma$; intervalle	Références
Orpailleurs, raffineurs d'or et villageois à proximité	Présence de signes et symptômes associés à une histoire d'exposition	Tapajós, Pará, Amazonie brésilienne	60 % des sujets sont des professionnels, exposition moyenne = 13,1 ans	55	30,5 \pm ? ; 4-130 (n = 54)	32,7 \pm ? ; 0-151* (n = 33)	BRANCHES, 1993
Commerçants d'or, orpailleurs		Bassin du RioTapajós, Amazonie brésilienne	Commerce	42	30,4 \pm ?	78,9 \pm ?**	CLEARY, 1994
			Orpillage	18	34,3 \pm ?	18,5 \pm ?**	
Orpailleurs, raffineurs et individus vivant près des lieux de raffinage	Signes et symptômes liés à une exposition, identifiés par un questionnaire	Etat du Pará, Brésil	I = récente < 2 j	10	24,8 \pm 44,1 ; 7,6-158,8	75,6 \pm 213,4 ; 6,5-35,9	AKS, 1995
			II = intermédiaire < 60 j	11	7,6 \pm 5,5 ; 2,2-19,4	23,8 \pm 84,0 ; 7,8-297,0	
			III = ancienne > 60 j	9	5,6 \pm 3,3 ; 3,1-14,3	7,0 \pm 9,8 ; 3,1-32,9	
Orpailleurs		Bassin amazonien, Brésil	Professionnels	20	? ; 2,0-29,3 (n = 10)	? ; 1,0-155 (n = 20)*	PALHETA, 1995
Orpailleurs		Rio Tapanahony Surinam	Exposés	28	18,1 \pm 11,0 (n = 25)	27,5 \pm 21,1	DE KOM, 1998 a
			Contrôles	17	26,8 \pm 14,6 (n = 16)	5,2 \pm 2,9	
Orpailleurs, raffineurs d'or, joailliers		Sites d'orpillage majeurs, Surinam	Orpailleurs	71		10,4 \pm 8,6 ; 1,1-40,2	DE KOM, 1998 b
			Joailliers	39		9,2 \pm 7,4	
Orpailleurs, raffineurs d'or, joailliers, commerçants d'or		Santarém, Itaituba et sa zone rurale, Rio Tapajós, Amazonie, Brésil	Raffineurs, commerçants	50		57,5 \pm ? ; 2,7-663*	JESUS, 1999
			Raffineurs, commerçants	81		27,8 \pm ? ; 2,9-255*	
			Orpailleurs	98		6,4 \pm ? ; 0,0-74,3*	

? : σ (déviation standard) non disponible.

n = nombre d'individus examinés.

* Exprimé en $\mu\text{g/l}$ et non en $\mu\text{g/g}$ créatinine.

Tableau II. Etudes portant sur les concentrations de mercure (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) dans l'atmosphère en zones urbaines et rurales et sur des sites d'orpaillage en activité (MALM, 1991).

Localisation	Nature des sites	Moyenne	n	Intervalle	Références
Rondônia, sud-ouest de l'Amazonie	Zone urbaine éloignée des lieux de raffinage	-	7	< 0,02 ≤ 0,66	MALM, 1991
	Zone urbaine proche des lieux de raffinage	2,8	8	0,45-7,5	
	Exposition professionnelle lors du raffinage dans les « <i>casas de ouro</i> »	71,4	7	17,5-107,2	
	Exposition professionnelle lors du brûlage de l'amalgame sur les sites d'orpaillage avec usage de divers types de retorte	91,7	6	< 10,24-296	
	Exposition professionnelle lors du brûlage de l'amalgame sur les sites d'orpaillage sans usage de retorte	15 499	6	< 4 229-59 600	
	Emanations lors de l'usage de la technique dite de reflux d'eau contraire destinée à récupérer le mercure	1 280	5	< 120-5 162	
	Echantillons d'air près des chutes d'eau (rivières)	-	3	< 0,14-0,5	
Ville de Poconé (zone urbaine), Amazonie centrale, Brésil	Zone urbaine, proche des sites de rebrûlage	-	10	< 0,14-1,86	MARINS, 1991 TUMPLING, 1995
	Au-dessous des résidus de minerai aurifère	0,08			
Ville de Alta Floresta, Amazonie brésilienne méridionale	Exposition professionnelle lors du raffinage dans les « <i>casas de ouro</i> »	5,14	86	0,07-40,6	HACON, 1995
	Zone urbaine éloignée des lieux de raffinage	0,61	152	0,01-5,79	

n = nombre d'échantillons.

LES RISQUES POUR LA SANTÉ

Les symptômes classiques relevant de la contamination par des vapeurs de Hg⁰ se manifestent dans le système nerveux central et les reins, qui sont les organes cibles du mercure sous sa forme dissoute Hg²⁺.

L'EXPOSITION AIGUË

L'exposition aiguë se manifeste après l'inhalation de fortes concentrations de vapeurs de Hg, par exemple, comme il a été dit, à l'occasion de la fusion de l'amalgame or-mercure dans les mines ou encore lors de la refonte des lingots d'or dans les maisons de vente/achat de l'or.

Les jours qui suivent l'exposition aux vapeurs, divers signes apparaissent, semblables à ceux d'une grippe, se caractérisant par un refroidissement accompagné de fièvre, de courbatures, de gorge sèche et de maux de tête. Au bout de deux semaines, des symptômes plus sévères se manifestent, qui portent sur le système nerveux central, l'appareil respiratoire, les systèmes gastro-intestinal et urologique. Les symptômes du système nerveux central persistent tandis que les maux affectant les autres organes se dissipent avec le temps.

L'EXPOSITION CHRONIQUE

L'exposition chronique se manifeste à la suite de l'inhalation de faibles concentrations de vapeurs de Hg⁰ ou encore de l'absorption cutanée de vapeurs au cours de périodes prolongées. C'est le cas des personnes qui travaillent durant des mois, voire des années, sur les sites d'orpaillage ou de raffinage de l'or, dans le voisinage immédiat des émissions de vapeurs de Hg⁰ (manipulation du mercure dans les processus d'amalgamation, destruction des amalgames, purification des lingots).

L'empoisonnement chronique par les vapeurs de Hg⁰ peut produire trois types de symptômes :

- de légers tremblements des doigts et parfois du visage aux stades précoces, puis l'apparition progressive de mouvements brusques et saccadés des lèvres ;

- des troubles neuropsychiatriques comportant fatigue, insomnie, anorexie et éréthisme (perte de mémoire) ; des changements insidieux du caractère peuvent être notés, tels qu'une tendance à l'isolement, à la dépression, entrecoupée par des moments d'irritabilité explosive, de perte de confiance en soi et d'assoupissement ;

- des gingivites.

Les cas les plus sévères sont accompagnés de délires avec hallucinations et de psychoses. Des modifications subcliniques dans la fonction nerveuse périphérique et dans la fonction rénale peuvent surgir.

L'OMS a recommandé des normes pour estimer les risques de contamination. Si la concentration de mercure dans les urines est supérieure à 100 µg/g de créatinine, la probabilité d'apparition des signes neurologiques classiques d'empoisonnement (tremblements, éréthisme) et de protéinurie est élevée. Des effets subtils apparaissent quand cette concentration est comprise entre 30 et 100 µg/g de créatinine. Il s'agit de symptômes subjectifs tels que la fatigue, l'irritabilité, la perte d'appétit chez des sujets plus sensibles, on observe des performances psychomotrices amoindries, des tremblements détectables et évidents ou un retard dans la transmission de l'influx nerveux, mais qui ne se traduisent pas par une détérioration clinique manifeste.

On ne dispose pas de données épidémiologiques précises pour des concentrations inférieures à 30 µg/g de créatinine (IPCS, 1991).

RÉSULTATS DES ÉTUDES

Divers signes cliniques de l'exposition chronique au Hg ont été étudiés chez les travailleurs professionnels : les signes sur le métabolisme, la vision, le système immunitaire et des signes neurologiques et neuropsychiatriques. Les groupes qui ont été les mieux suivis sont les mineurs de mercure et les travailleurs dans les industries faisant usage de Hg (celles en particulier fabriquant des produits chloroalcalins). Dans ces dernières usines, les travailleurs exposés de façon permanente aux vapeurs de Hg souffrent de troubles moteurs et psychiques qui peuvent durer plus de dix ans après la dernière exposition aux vapeurs de Hg (KISHI, 1993 ; MATHIESEN, 1999). Le tableau III résume les principales données de ces études.

Tableau III. Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
Caractère carcinogène			
Mineurs et populations d'orpailleurs exposés aux vapeurs de Hg	Forte exposition professionnelle ou forte contamination environnementale par le passé	Données épidémiologiques éparses portant sur les risques d'atteinte des poumons, des reins et du système nerveux central. Des données plus complètes sont indispensables.	BOFFETTA, 1993
Fonctions métaboliques			
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 37 individus exposés et 39 individus non exposés (groupes de même tranche d'âge)	Urine (µg/g de créatinine) : 26,6 chez les sujets exposés, 3,5 chez les sujets non exposés	L'effet d'une exposition modérée aux vapeurs de mercure sur le métabolisme du sélénium est d'importance mineure sur le plan clinique.	BARREGÅRD, 1990
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 40 individus exposés et 40 non exposés (même tranche d'âge)	Urine (µg/g de créatinine) : 20,4 chez les sujets exposés, 3,2 chez les sujets non exposés	Une exposition aux vapeurs de mercure provoque une excrétion accrue de zinc par les urines.	SALLSTEN, 1997
Fonctions reproductives			
Employées féminines exposées aux vapeurs de Hg ⁰ : 46 femmes exposées et 19 non exposées (choisies dans un secteur non productif de la même usine)	Période 1948-1977, 104 grossesses enregistrées au total	On observe une plus grande fréquence d'anomalies congénitales parmi les femmes exposées à des niveaux de mercure inférieurs à 0,6 mg/m ³ d'air. Pas de différences significatives dans les taux de mort-nés ou de fausses couches entre les deux groupes. Pour la même période, les taux de morts fœtales sont semblables à ceux établis à l'échelle de l'Etat et des Etats-Unis.	ELGHANY, 1997

Tableau III (suite). - Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
Fonctions de la vision			
Travailleurs exposés aux vapeurs de Hg ⁰ : 33 sujets exposés, 33 non exposés pris comme référence. L'âge, le sexe, les habitudes d'alcool et de tabac étant vérifiés équivalents dans les deux groupes	Urine (intervalle, µg/g de créatinine) : 28 à 287 chez les sujets exposés	L'exposition aux concentrations de vapeurs de Hg qui conduisent à des concentrations dans les urines supérieures à 50 µg/g de créatinine peut induire une perte de la perception des couleurs.	CAVALLERI, 1995
Même cas que le précédent : 21 sujets exposés, 21 sujets de contrôle.	Urine (intervalle, µg/g de créatinine) : 115 ± 61,5 chez les sujets exposés, tombant 12 mois après à 10	Il peut y avoir une diminution de la perception des couleurs, selon un processus qui est de nature réversible.	CAVALLERI, 1998
Fonctions immunologiques			
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 26 sujets exposés durant 10 ans en moyenne et 26 non exposés, de même âge	Urine (µg/g de créatinine) : 28,4 chez les sujets exposés et 2,3 chez les sujets non exposés	Il est signalé des effets cytogénétiques sur les lymphocytes-T.	BARREGÅRD, 1991
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 41 sujets exposés durant 9 ans en moyenne et 41 non exposés (même tranche d'âge)	Urine (moyenne, µg/g de créatinine) : 27 chez les sujets exposés et 3,4 chez les sujets non exposés	Une défense immunitaire durable à un niveau élevé d'exposition est rare. Toutefois, une faible fraction de la population peut développer une résistance immunitaire.	BARREGÅRD, 1997

Tableau III (suite). Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
Employés d'une usine de production de mercure : 36 sujets exposés durant 19 mois en moyenne	Urine (moyenne \pm SD, $\mu\text{g/g}$ de créatinine) : $19,4 \pm 10$. Des niveaux au moment du test ainsi que 3 mois auparavant en dessous de $50 \mu\text{g/g}$ de créatinine (seuil de sécurité)	Le sérum immunoglobulin (IgE), anti-DNA et les anticorps anti-nucleus ont été examinés. Une augmentation significative des niveaux de IgE a été observée, accompagnée d'une corrélation négative entre la durée d'exposition et les niveaux. Il n'a pas été noté d'anticorps anti-DNA et anti-nucleus. Les résultats suggèrent une réponse immunitaire humorale, indicatrice de modifications cellulaires chez les travailleurs chroniquement exposés au mercure, avec des niveaux de mercure dans les urines considérés comme à l'abri de tout risque dans les aires de travail ($< 50 \mu\text{g/g}$ de créatinine).	DANTAS, 1997
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg^0 dans une usine de production de chlore et de soude : 89 sujets exposés, 75 non exposés (âge, éducation, compréhension verbale, travaux à la tâche semblables d'un groupe à l'autre)	Urine ($\mu\text{g/g}$ de créatinine) : 25,4 chez les sujets exposés et 1,9 chez les sujets non exposés Sang (nmol/l) : 11 chez les sujets exposés et 3 chez les sujets non exposés	Les paramètres de dysfonctionnement rénal, immunoglobulines et anticorps vers les glomeruli et autres tissus, ont été déterminés. Les concentrations d'immunoglobulines dans le sérum n'ont pas présenté de différence d'un groupe à l'autre. Les titres d'anticorps ont été trouvés faibles dans les deux groupes. Statistiquement, des relations significatives ont été établies entre les niveaux de mercure dans les urines et l'urine NAG. Il n'a pas été mis en évidence un effet sur le système immunitaire, ni des dommages glomérulaires, ni une résorption de défauts tubulaires à des expositions considérées habituellement comme faibles. Dans le groupe exposé au mercure, de faibles doses affectent les cellules tubulaires.	LANGWORTH, 1992 b
Travailleurs exposés au mercure : 48 sujets exposés, 48 non exposés de même âge et même sexe	Urine ($\mu\text{g/g}$ de créatinine) : $24 \pm 20,1$ chez les sujets exposés ; 44 travailleurs en dessous de $50 \mu\text{g/g}$ de créatinine (niveau « sans risque »)	Les résultats suggèrent qu'un niveau « sans risque » d'exposition peut conduire à une altération de la fonction neutrophile de leucocytes polymorphonucléaires.	PERLINGEIRO, 1995

Tableau III (suite). Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
Travailleurs exposés au mercure : 44 sujets exposés, 44 non exposés de même âge et même sexe	Urine (moyenne \pm SD, $\mu\text{g/g}$ de créatinine) : $24,7 \pm 19,1$ chez les sujets exposés ; 40 travailleurs en dessous de $50 \mu\text{g/g}$ de créatinine (niveau « sans risque »)	Les concentrations d'immunoglobulines (IgG, IgM, IgA) sont examinées et comparées entre les deux groupes. Les résultats indiquent que le niveau d'exposition « sans risque » peut conduire à une stimulation immunologique humorale.	QUEIROZ, 1994
Employés d'une usine de production de mercure : 33 sujets exposés durant 19 mois en moyenne	Niveaux d'urine au moment du test et trois mois auparavant en dessous de $50 \mu\text{g/g}$ de créatinine (niveau « sans risque »)	Recherche d'effets sur les cellules « <i>T-helper</i> » et « <i>T-suppressor</i> », et sur la prolifération des cellules T. Il n'a pas été trouvé de corrélation entre des modifications de lymphocytes et des concentrations de mercure dans les urines, la durée d'exposition ni l'âge des travailleurs.	QUEIROZ, 1997
Employés d'usine de production de mercure : 15 sujets exposés pendant 12 ans	Niveaux d'urine au moment du test et six mois auparavant en dessous de $50 \mu\text{g/g}$ de créatinine (niveau « sans risque »)	Il a été recherché la présence de micronuclei dans les lymphocytes. Les résultats semblent mettre en évidence un effet génotoxique chez les travailleurs exposés de façon chronique à des niveaux considérés comme biologiquement sans risque.	QUEIROZ, 1999
Fonctions rénales			
Travailleurs produisant du gaz naturel, du mercure	Trois groupes de travailleurs à différents niveaux en dessous de l'indice d'exposition biologique de $35 \mu\text{g/g}$ de créatinine	Les résultats suggèrent une augmentation momentanée des niveaux de NAG*, mais cette augmentation n'est pas un indicateur précoce de dysfonctionnement rénal.	BOOGAARD, 1996
Travailleurs d'une usine de fabrication de thermomètres à mercure : 84 sujets exposés, 79 non exposés	Personnel respirant un air contenant $25,6-270,6 \mu\text{g}$ de Hg/m^3 Urine (moyenne, $\mu\text{g/g}$ de créatinine) : 73 chez les sujets exposés, 4 chez les sujets non exposés	Une corrélation positive a été trouvée entre les niveaux de NAG* et ceux de mercure dans les urines.	EHRENBERG, 1991

Tableau III (suite) : Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 60 sujets exposés (moyenne ± SD) 13,7 ± 5,5 années, et 60 non exposés	Evaluation d'une exposition longue durée, donnée à partir d'une moyenne pondérée dans le temps d'une concentration de Hg dans le sang (approx. 25 µg/m ³ d'air)	La fonction rénale contrôlée par l'albumine dans les urines et NAG*. Il n'a été détecté ni effets glomérulaires, ni effets tubulaires dans les groupes exposés.	PIIKIVE, 1989
Fonctions du système nerveux central			
Employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 89 individus exposés, 75 non exposés (âge, éducation, compréhension verbale, travaux à la tâche semblables d'un groupe à l'autre)	Urine (µg/g de créatinine) : 25,4 chez les sujets exposés, 1,9 chez les sujets non exposés Sang (µg /l) : 11 chez les sujets exposés, 3 chez les sujets non exposés	Les calculs de dose-réponse ont montré de faibles, mais statistiquement significatives, relations entre la fréquence des symptômes et les niveaux de mercure dans le sang et l'urine. Les résultats indiquent un léger effet induit par le mercure sur le CNS parmi les travailleurs.	LANGWORTH, 1992 a
Ex-employés masculins exposés aux vapeurs de Hg ⁰ dans une usine de production de chlore et de soude : 75 individus exposés 7,9 ans en moyenne pour un intervalle de 1,1 à 36,2 années, 52 non exposés (âge, éducation, compréhension verbale semblables d'un groupe à l'autre)	Indice d'urine cumulatif (nmol/l/an) Moyenne annuelle sur des sujets exposés : 539 ; intervalle : 41-2 921 Durée moyenne après cessation : 12,7 (intervalle 1-35) années	Des examens ont été menés avec une batterie extensive de tests neuropsychologiques. Les résultats suggèrent un effet modéré mais persistant sur le SNC, impliquant surtout des fonctions motrices et l'attention, ainsi que, possiblement, la capacité visuelle. Une exposition antérieure ne semble pas avoir affecté le niveau général de l'intellect des travailleurs ou encore leur capacité à mener un raisonnement logique.	MATHIESEN, 1999

Tableau III (fin). Etude des effets sur la santé des travailleurs professionnels de l'exposition chronique aux vapeurs de mercure.

Sujets exposés	Expositions	Effets sur la santé	Références
		Fonctions neurologiques	
Travailleurs d'usine : 18 individus exposés aux vapeurs de Hg ⁰	Indices moyens intégrés dans le temps de Hg dans l'urine : 0,02-0,45 mg/l ; valeur moyenne : 0,29 mg/l	Tests de conduction nerveuse périphérique. Corrélations significativement positives entre les concentrations de mercure dans les urines et un allongement des latences sensorielles et motrices distales.	LEVINE, 1982
18 travailleurs exposés au Hg, 18 non exposés	Urine (moyenne en µg/l) : 23 chez les sujets exposés	Tous les travailleurs sont asymptomatiques à l'examen clinique neurologique, mais des tremblements anormalement fréquents se manifestent au niveau des doigts. Des expositions au mercure habituellement permises ont pour effet de provoquer des tremblements subtils lors de l'accomplissement de mouvements volontaires.	CHAPMAN, 1990
Ex-mineurs de mercure masculins : deux groupes équivalents de 76 individus exposés et non exposés (âge et niveau d'instruction comparables)	En moyenne de 18 ans après exposition aux vapeurs de Hg ⁰ > 1,0 mg/m ³ ; histoire d'une intoxication retracée	Il y a de légers effets sur le comportement neuronal chez les mineurs, en particulier sur la coordination motrice, qui peuvent persister 10 ans après la cessation de l'exposition.	KISHI, 1993

* NAG = N-acétyl-bêta-D-glucosaminidase, une enzyme lysosomiale présente dans les cellules tubulaires rénales. Des niveaux élevés de NAG reflètent plus couramment un processus traumatique qu'une intoxication aiguë (ELLENHORN, 1997, p. 1595).

L'influence de l'intoxication mercurielle sur la capacité de résistance au paludisme a été étudiée dans certaines mines, mais peu de résultats ont été publiés à ce jour dans des revues internationales. On les retrouve essentiellement dans la littérature « grise ». Le site « Mercury Network » (www.hruscha.com/hg-net) en est un exemple. Dans cette littérature, on trouve également des informations sur les pratiques qui permettent de réduire l'exposition des orpailleurs aux vapeurs de mercure, par l'introduction de retortes pour la phase de brûlage de l'amalgame Au-Hg ou encore par des méthodes alternatives permettant d'éviter l'usage du Hg. Le Centre des technologies minières au Brésil (CETEM) a mené des études approfondies dans ce domaine.

[Références bibliographiques]

- AKS S.E., ERICKSON T., BRANCHES F.J.P., NALEWAY C., CHOU H.N., LEVY P., HRYHORCZUK D., 1995. Fractional mercury levels in Brazilian gold refiners and miners. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.*, 33 (1) : 1-10.
- BARREGÅRD L., THOMASSEN Y., SCHÜTZ A., MARKLUND S.L., 1990. Levels of selenium and antioxidative enzymes following occupational exposure to inorganic mercury. *Sci. Total Environ.*, 99 (1-2) : 37-47.
- BARREGÅRD L., HÖGSTEDT B., SCHÜTZ A., KARLSSON A., SÄLLSTEN G., THIRINGER G., 1991. Effects of occupational exposure to mercury vapor on lymphocyte micronuclei. *Scand. J. Work Environ. Health*, 17 : 263-268.
- BARREGÅRD L., ENESTRÖM S., LJUNGHUSEN O., WIESLANDER J., HULTMAN P., 1997. A study of autoantibodies and circulating immune complexes in mercury-exposed chloralkali workers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 70 (2) : 101-106.
- BELILES R.P., 1994. « Mercury ». In CLAYTON G.D., CLAYTON F.E. (éd.) : *Patty's Industrial Hygiene and Toxicology*, vol. II, part C, *Toxicology*, New York, Wiley, 4th ed. : 2124-2146.
- BERLIN M., 1986. « Mercury ». In FRIBERG L., NORDBERG G.F. (éd.) : *Handbook on the Toxicology of Metals*, Amsterdam, Elsevier, 2nd ed. : 387-445.
- BOFFETTA P., MERLER E., VAINIO H., 1993. Carcinogenicity of mercury and mercury compounds. *Scand. J. Work Environ. Health*, 19 (1) : 1-7.
- BOOGAARD P.J. et al., 1996. Effects of exposure to elemental mercury on the nervous system and the kidneys of workers producing natural gas. *Arch. Environ. Health*, 51 (2) : 108-115.
- BRANCHES F.J.P., ERICKSON T.B., AKS S.E., HRYHORCZUK D.O., 1993. The price of gold : mercury exposure in the Amazonian rain forest. *J. Toxicol. Clin. Toxicol.*, 31 (2) : 295-306.

- CAVALLERI A., BELOTTI L., GOBBA F., LUZZANA G., ROSA P., SEGHIZZI P., 1995. Colour vision loss in workers exposed to elemental mercury vapour. *Toxicol. Lett.*, 77 (1-3) : 351-356.
- CAVALLERI A., GOBBA F., 1998. Reversible color vision loss in occupational exposure to metallic mercury. *Environ. Res.*, 77 (2) : 173-177.
- CHAPMAN L.J., SAUTER S.L., HENNING R.A., DODSON V.N., REDDAN W.G., MATTHEWS C.G., 1990. Differences in frequency of finger tremor in otherwise asymptomatic mercury workers. *Br. J. Ind. Med.*, 47 (12) : 838-843.
- CLEARY D., THORNTON I., BROWN N., KAZANTZIS G., DELVES T., WORTHINGTON S., 1994. Mercury in Brazil. *Nature*, 369 : 613-614.
- DANTAS D.C., QUEIROZ M.L., 1997. Immunoglobulin E and autoantibodies in mercury-exposed workers. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.*, 19 (3) : 383-392.
- DE KOM J.F.M., VAN DER VOET G.B., DE WOLFF F.A., 1998 a. Mercury exposure of maroon workers in the small scale gold mining in Suriname. *Environ. Res.*, 77 (2) : 91-97.
- DE KOM J.F.M. 1998 b. *Results of the human sampling program. Introducing retorts for the abatement of mercury pollution in Suriname.* Paramaribo, Report HWO Consultancy, 65 p.
- EHRENBERG R.L., VOGT R.L., SMITH A.B., BRONDUM J., BRIGHTWELL W.S., HUDSON P.J., McMANUS K.P., HANNON W.H., PHIPPS F.C., 1991. Effects of elemental mercury exposure at a thermometer plant. *Am. J. Ind. Med.*, 19 : 495-507.
- ELGHANY N.A., STOPFORD W., BUNN W.B., FLEMING L.E., 1997. Occupational exposure to inorganic mercury vapour and reproductive outcomes. *Occup. Med.*, 47 (6) : 333-336.
- ELLENHORN M.J., 1997. *Ellenhorn's Medical Toxicology, diagnosis and treatment of human poisoning.* Baltimore, Williams and Wilkens, 2nd ed.
- ELLENHORN M.J., SCHONWALD G., ORDOG G., WASSERBERGER J., 1997. « Mercury ». In : *Ellenhorn's Medical Toxicology, diagnosis and treatment of human poisoning,* Baltimore, Williams and Wilkens, 2nd ed. : 1588-1599.
- EPA, 1997. *Mercury study report to Congress. Vol. V. Health effects of mercury compounds.* United States Environmental Protection Agency, 349 p.
- HACON S., ARTAXO P., CAMPOS R.C., CONTI L.F., LACERDA L.D., 1995. Atmospheric mercury and trace elements in the region of Alta Floresta in the Amazon Basin. *Water Air Soil Pollut.*, 80 : 273-283.
- IPCS, 1991. *Inorganic mercury, Environmental Health Criteria 118.* Geneva, World Health Organization, 168 p.
- JESUS I.M., SANTOS E.C.O., BRABO E.S., LOUREIRO E.C.B., MASCARENHAS A.F.S., 1999. « Exposure to elemental mercury in urban workers and "garimpeiros" from Tapajós region, Para, Brazil ». In BARBOSA J.P., MELAMED R., VILLAS-BOAS R. (éd.), 1999. *Proceedings of the Fifth International Conference on Mercury as a global pollutant (May 23-27 1999, Rio de Janeiro, Brasil), Book of abstracts,* Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia Mineral : 365.
- KISHI R., DOI R., FUKUCHI Y., SATOH H., SATOH T., ONO A., MORIWAKA F., TASHIRO K.,

- TAKAHATA N., SASATANI H., SHIRAKASHI H., KAMADA T., NAKAGAWA K., 1993. Subjective symptoms and neurobehavioral performances of ex-mercury miners at an average of 18 years after the cessation of chronic exposure to mercury vapor. *Environ. Res.*, 62 (2) : 289-302.
- LACERDA L.D., MALM O., GUIMARÃES J.R.D., SALOMONS W., WILKEN R.D., 1995. « Mercury and the new gold rush in the South ». In SALOMONS W., STIGLIANI W.M. (éd.) : *Biogeodynamics of pollutants in soils and sediments : risk assessment of delayed and non-near responses*, Berlin, Springer-Verlag : 213-245.
- LACERDA L.D., SALOMONS W., 1998. *Mercury from gold and silver mining : a chemical time bomb ?* Berlin, Springer-Verlag, 146 p.
- LANGWORTH S., ALMKVIST O., SÖDERMAN E., WIKSTRÖM B.O., 1992 a. Effects of occupational exposure to mercury vapour on the central nervous system. *Br. J. Ind. Med.*, 49 (8) : 545-555.
- LANGWORTH S., ELINDER C.G., SUNDQUIST K.G., VESTERBERG O., 1992 b. Renal and immunological effects of occupational exposure to inorganic mercury. *Br. J. Ind. Med.*, 49 (6) : 394-401.
- LEVINE S.P., CAVENDER G.D., LANGOLF G.D., ALBERS J.W., 1982. Elemental mercury exposure : peripheral neurotoxicity. *Br. J. Ind. Med.*, 39 (2) : 136-139.
- MALM O., 1998. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. *Environ Res.*, 77 (2) : 73-78.
- MALM O., PFEIFFER W.C., SOUZA C.M.M., 1991. « Main pathways of mercury in the Madeira river area, Rondônia, Brazil ». In : *Proceedings of the Eighth International Conference on Heavy metals in the environment*, Edinburgh, CEP Consultants : 515-518.
- MARINS R.V., IMBASSAY J.A., PFEIFFER W.C., BASTOS W.R., 1991. « Contaminação atmosférica de mercúrio em área produtora de ouro no distrito de Poconé, MT ». In : *Proceedings of the First International Symposium on Environmental Studies, Tropical Forest*, Rio de Janeiro, Biosfera Edition : 209-213.
- MATHIESEN T., ELLINGSEN D.G., KJUS H., 1999. Neuropsychological effects associated with exposure to mercury vapor among former chloralkali workers. *Scand. J. Work Environ. Health*, 25 (4) : 342-350.
- PALHETA D., TAYLOR A., 1995. Mercury in environmental and biological samples from a gold mining area in the Amazon region of Brazil. *Sci. Total Environ.*, 168 (1) : 63-69.
- PERLINGEIRO R.C., QUEIROZ M.L.S., 1995. Measurement of the respiratory burst and chemotaxis in polymorphonuclear leukocytes from mercury-exposed workers. *Hum. Exp. Toxicol.*, 14 (3) : 281-286.
- PIIKIVI L., RUOKONEN A., 1989. Renal function and long-term low mercury vapor exposure. *Arch. Environ. Health*, 44 (3) : 146-149.
- QUEIROZ M.L.S., PERLINGEIRO R.C.R., DANTAS D.C.M., ANNICHINO BIZZACCHI J.M., DE CAPITANI E.M., 1994. Immunoglobulin levels in workers exposed to inorganic mercury. *Pharmacol. Toxicol.*, 74 (2) : 72-75.
- QUEIROZ M.L.S., DANTAS D.C.M., 1997. B lymphocytes in mercury-exposed wor-

- kers. *Pharmacol. Toxicol.*, 81 (3) : 130-133.
- QUEIROZ M.L.S., PENA S.C., SALLES T.S.I., DE CAPITANI E.M., SAAD S.T.O., 1998. Abnormal antioxidant system in erythrocytes of mercury-exposed workers. *Hum. Exp. Toxicol.*, 17 (4) : 225-230.
- ROELS H., ABDELADIM S., CEULEMANS E., LAUWERYS R., 1987. Relationships between the concentrations of mercury in air and in blood or urine in workers exposed to mercury vapour. *Ann. Occup. Hyg.*, 31 (2) : 135-145.
- SÄLLSTEN G., BARREGÅRD L., 1997. Urinary excretion of mercury, copper and zinc in subjects exposed to mercury vapour. *Biometals*, 10 (4) : 357-361.
- TUMPLING W.V., WILKEN R.R., EINAX J., 1995. Mercury contamination in the northern Pantanal region, Mato Grosso, Brazil. *J. Geochem. Explor.*, 52 : 127-134.
- VEIGA M.M., 1997. *Introducing new technologies for abatement of global mercury pollution in Latin America*. Rio de Janeiro, UNIDO/UBC/CETEM/CNPq, 94 p.