

## Répartition des teneurs en mercure dans les eaux de surface du bassin du Madeira et de l'Amazone

**L. MAURICE-BOURGOIN**

*ORSTOM Bolivie, CP 9214 La Paz, Bolivie*

**J. L. GUYOT, P. SEYLER**

*ORSTOM Bresil, CP 09747, 70001-970 Brasilia DF, Brésil*

**P. COURAU**

*LPCM, BP 8, 06230 Villefranche sur Mer, France*

**N. FILIZOLA**

*DNAEE, Ministeria de Minas e Energias, 70000 Brasilia, DF, Brésil*

**J. QUINTANILLA**

*UMSA IIQ, CP 330, La Paz, Bolivie*

**Résumé** Un important problème d'environnement particulièrement à l'ordre du jour au Brésil et en Bolivie concerne la contamination du milieu aquatique par le mercure, utilisé pour extraire l'or par amalgamation. Cette étude présente un transect longitudinal des concentrations en mercure dans les eaux de surface depuis les sous-bassins andins jusqu'à l'Amazone, à Obidos. La combinaison de techniques "ultra-propres" de prélèvement et de stockage des échantillons avec la spectrophotométrie de fluorescence atomique permet de présenter des résultats fiables dans les phases dissoute et particulaire des eaux et donc de corriger les valeurs récemment publiées par d'autres auteurs. Trois grandes zones sont mises en évidence : les sources andines, avec des teneurs inférieures à 2 ng Hg l<sup>-1</sup>, le bassin du Madeira, dans la plaine amazonienne, avec une moyenne de 6.5 ± 1.3 ng Hg l<sup>-1</sup>, et l'Amazone, de sa confluence avec le Madeira, à Obidos avec une moyenne beaucoup plus élevée, de 18.2 ± 1.1 ng Hg l<sup>-1</sup>. Le Madeira, avec un flux en basses eaux de 17.06 kg Hg day<sup>-1</sup>, contribue à 6% dans les apports totaux par l'Amazone à Obidos, la participation des Andes boliviennes n'en représentant que 2%.

### INTRODUCTION

Le bassin de l'Amazone, premier mondial par sa superficie et par le débit de son fleuve, fait l'objet de nombreuses recherches dans le domaine de la géochimie des eaux et particulièrement sur le problème de la contamination par le mercure des zones à forte exploitation aurifère. Le mercure est en effet utilisé pour extraire l'or des autres particules contenues dans les eaux et les sédiments de fond. Un tri granulométrique est d'abord effectué sur les suspensions et les sédiments avant leur amalgamation. Au cours de cette procédure, 5 à 30% du mercure utilisé est rejeté directement dans les rivières (Malm *et al.*, 1990) tandis que pratiquement tout le reste peut s'échapper sous forme de mercure élémentaire dans l'atmosphère au moment de l'extraction d'or par calcination de l'amalgame. En raison des conditions de travail précaires et du manque d'informations sur les quantités d'or extraites des rivières brésiliennes et boliviennes, il est relativement difficile d'estimer les quantités

de mercure utilisé et échappé dans l'environnement. De nombreux auteurs (Lacerda *et al.*, 1989; Malm *et al.*, 1990; Pfeiffer *et al.*, 1993; LIDEMA, 1993) font état d'un rapport Hg émis/Au extrait de 1 à 10 dans le bassin versant du Madeira.

Au Brésil, l'activité minière d'exploitation d'or dans le bassin amazonien emploie près d'un million de personnes sur une superficie de 170 000 km<sup>2</sup>, pour une production estimée entre 1983 et 1990, entre 40 et 100 t d'or par an (Pfeiffer *et al.*, 1993). En Bolivie, de 1979 à 1992, l'extraction d'or alluvial dans le Madeira sur sa partie frontalière avec le Brésil, a été estimée à 80 t d'or (LIDEMA, 1993). Les conséquences environnementales de cette exploitation, essentiellement réalisée à partir de dragues flottantes, sont alarmantes puisqu'ont été mesurées dans les sédiments, des teneurs en mercure de l'ordre du gramme par litre, et dans les poissons, des teneurs de 800 ppb alors que la valeur seuil autorisée au Brésil est de 500 ppb. Cependant, les études réalisées tant au Brésil qu'en Bolivie ne donnent aucune valeur de mercure dissous dans les eaux en raison de la stratégie d'échantillonnage, de la méthodologie et des techniques analytiques utilisées.

Plus en amont, dans le haut bassin du rio Béni, les activités liées à la recherche de l'or alluvial sont importantes et remontent à 50 ans environ. Dans le bassin des rios Tipuani, caractérisé par la formation aurifère Cangalli (Coudrain-Ribstein *et al.*, 1992), Mapiri, Kaka, Alto-Béni et Béni, les alluvions des terrasses et du lit actuel des cours d'eau constituent la seconde source d'or exploitable, la première étant contenue dans la paléovallée, jusqu'à environ 100 m de profondeur. Dans les rios Mapiri et Kaka, les deux principales compagnies aurifères ont exploité jusqu'en 1992, 86 Mm<sup>3</sup> d'or. Dans le secteur central de la rivière Tipuani, ont été estimés 8.5 Mm<sup>3</sup> d'alluvions contenant une teneur moyenne d'or de 1.7 g m<sup>-3</sup> (Héraïl *et al.*, 1986). Les sources de ces rivières se rencontrent pour la majorité dans la zone nord de la cordillère orientale. L'or dans cette région est exploité en période de basses eaux, par dragage des sédiments de fond jusqu'au bed-rock où les teneurs sont les plus fortes, soit par des coopératives, soit par des riverains. Il est donc impossible de connaître exactement le volume d'or extrait de ces sédiments et donc d'estimer le volume de mercure utilisé. L'or exploité dans le bassin amazonien bolivien au cours de cette dernière décennie se présente essentiellement sous forme de particules fines, ce qui a considérablement diminué la rentabilité et le nombre des coopératives aurifères.

## DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude couvre une partie du bassin de l'Amazone depuis les sources andines du Madeira, le plus important affluent méridional de l'Amazone, jusqu'à Obidos (Fig. 1). La particularité du bassin du Madeira jusqu'à sa confluence avec l'Amazone est de traverser trois zones géomorphologiquement distinctes: la cordillère des Andes (25%), le bouclier brésilien (27%) et la plaine amazonienne (48%), toutes plus ou moins exploitées pour leur or, qu'il soit présent sous forme natif ou alluvial. Le bassin versant étudié représente au total  $4.67 \times 10^6$  km<sup>2</sup>, dont 29% sont occupés par le bassin du Madeira.

La période d'échantillonnage (MADEIRA 95) s'est déroulée du 15 juin au 6 juillet 1995, en basses eaux dans la partie bolivienne du bassin du Madeira, et en

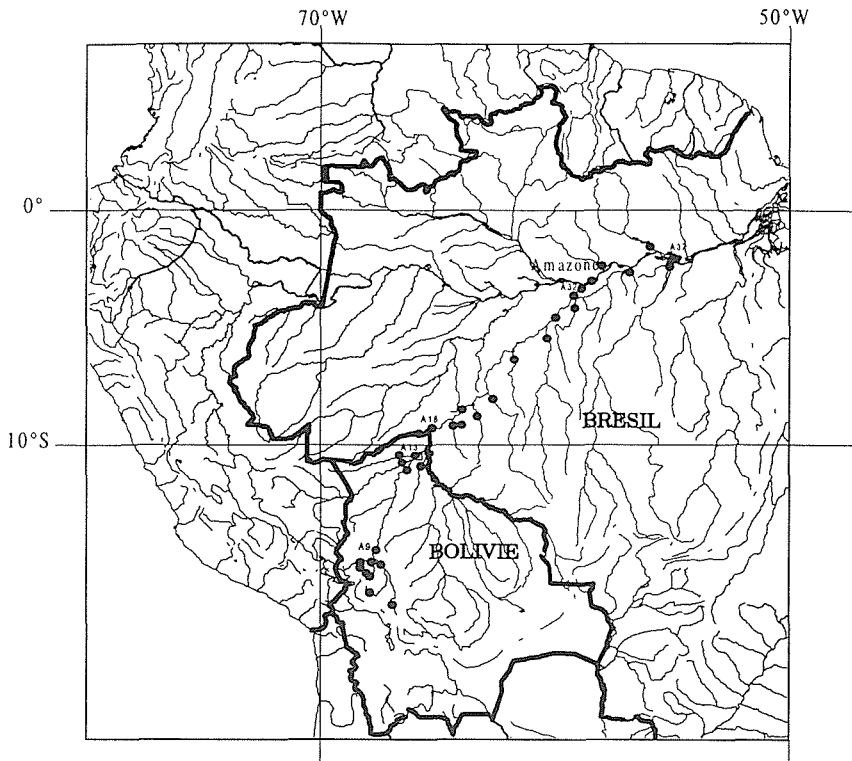


Fig. 1 Carte du réseau hydrographique du bassin de l'Amazone et présentation des points d'échantillonnage étudiés au cours de la campagne MADEIRA 95, du 15 juin au 6 juillet 1995.

hautes eaux sur le fleuve. Le débit mesuré à Obidos au cours de cette campagne était de  $196\,700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , valeur du module interannuel ; la rivière Madeira représentait alors 10% du débit total de l'Amazone à Obidos. L'aire échantillonnée couvre les sous-bassins andins, la forêt d'altitude, une partie du bouclier brésilien et de la plaine amazonienne, soit des altitudes de 4950 m à quelques mètres. Les principales zones d'activité minière sont réparties dans le bassin du Madeira, d'une part, au niveau des sous-bassins des rivières Challana, Tipuani, Mapiri et Kaka, situées dans le piémont andin, et d'autre part, dans les affluents de plaine près de la frontière séparant la Bolivie du Brésil (Orthon, Madre de Dios, Mutumparana et Jaciparana).

## MATERIEL ET METHODES

### Procédures d'échantillonnage

Les eaux de surface ont été prélevées dans des flacons en Téflon préalablement nettoyés à l'acide nitrique, selon un protocole "ultra-propre" (Ahlers *et al.*, 1990; Nolting & Jong, 1994; Gaudet *et al.*, 1995) et conservés dans des sacs de polyéthylène. A chaque point de prélèvement, la température, la conductivité et le pH ont été relevés *in situ* à l'aide de sondes HACH.

Les échantillons d'eau ont été filtrés sur des filtres en micro-fibres de quartz (Whatman QM-A ; porosité, 0,8  $\mu\text{m}$ ), prépesés, préalablement passés au four à 450°C pendant 24 h, pour éliminer toute trace de matière organique, puis nettoyés à l'acide nitrique (5% v/v  $\text{HNO}_3$  Suprapur) pendant 3 jours. Tous les filtres ont été préservés dans des porte-filtres en polystyrène également nettoyés à l'acide nitrique à 5% v/v. Les filtrations ont été réalisées sous hotte portable à flux laminaire de classe 100, dans un délai de 1 à 6 h après le prélèvement. Les filtrats ont été conservés dans des flacons en Téflon "ultra-propres" et acidifiés à pH 1, à l'HCl Suprapur Merck. Ces flacons ont été hermétiquement fermés et conservés à l'abri de la lumière dans des sacs de polyéthylène jusqu'à analyse.

### Traitement des échantillons

Les filtrats ont été analysés directement sans traitement particulier, limitant ainsi les risques de contamination liés à l'ajout de réactifs. La digestion des filtres a été réalisée dans des godets Savillex de 60 ml en Téflon PFA préalablement nettoyés et dont chaque blanc a été vérifié. A la matrice d'attaque des filtres, soit 20 ml d'eau de mer acidifiée à l'acide sulfurique à 1%, ont été ajoutés 50  $\mu\text{l}$  de  $\text{KMnO}_4$  à 6‰ afin de décomposer les complexes organiques du mercure. Chaque échantillon a ensuite subi une attaque aux ultrasons pendant 40 minutes dans le souci de désorber mécaniquement les particules des filtres à analyser. Avant analyse, 50  $\mu\text{l}$  d'hydroxylamine ( $\text{NH}_2\text{OH}$ , HCl 12 g  $\text{l}^{-1}$ ) ont été ajoutés à chaque échantillon dans le but de neutraliser le brome libéré de la matrice d'eau de mer dont les traces interfèrent lors de la fixation du mercure sur l'or (Quémerais & Cossa, 1995).

### Détermination analytique

Le mercure total a été déterminé par spectrophotométrie de fluorescence atomique (MERLIN PSA), méthode analytique beaucoup plus sensible que la spectrophotométrie d'absorption atomique puisqu'elle permet de détecter des teneurs en mercure dans les eaux de surface jusqu'à 0.05 ng  $\text{l}^{-1}$ . Le mercure est réduit sous sa forme élémentaire par ajout de  $\text{SnCl}_2$ , puis un bullage d'argon permet l'entraînement de la vapeur de mercure que l'on retient par immobilisation sur un piège d'or. Une fois la totalité du mercure transférée sur l'or, un chauffage du piège à la flamme libère rapidement le mercure à l'état de vapeur qui est alors détecté par fluorescence atomique (à 253.7 nm). L'addition d'étalon et les droites de calibration réalisées quotidiennement ont permis de calculer précisément les concentrations en mercure contenues dans chaque échantillon. La précision et l'exactitude de la méthode ont été vérifiées par son excellente reproductibilité (0.1 à 2%) et la faiblesse des blancs de réactifs qui sont du même ordre de grandeur que la limite de détection imposée par le blanc d'argon. Sur la phase dissoute des échantillons d'eau, la limite de détection est de 5 pg Hg. La moyenne des blancs d'acide ajouté à chaque filtrat est de 8 pg  $\text{l}^{-1}$ , soit une contribution de 0.1% sur les concentrations mesurées sur des aliquotes variant de 5 à 10 ml. En revanche, la précision des analyses réalisées sur la fraction particulaire

est limitée par l'écart-type des blancs de filtres, de 25 pg Hg, avec une teneur moyenne de 64 pg Hg mesuré sur des filtres vierges. Sur un volume de digestat de 20 ml, 0.5 à 5 ml d'aliquotes ont été analysés en fonction de la gamme de concentration obtenue.

## RESULTATS ET DISCUSSION

Les concentrations en mercure total mesurées au cours de la campagne MADEIRA 95 varient de 1.95 ng l<sup>-1</sup> dans les eaux du Zongo, au pied du glacier, soit au point le plus amont du bassin, à 19.75 ng l<sup>-1</sup> dans les eaux du Uatuma, confluent aval de l'Amazone (Tableau 1). La répartition longitudinale des teneurs en mercure total dans les fractions dissoute et particulaire permet de distinguer trois grandes zones (Fig. 2): la source andine, avec des teneurs inférieures à 2 ng Hg l<sup>-1</sup>, le bassin du Madeira, avec une moyenne de 6.5 ± 1.3 ng Hg l<sup>-1</sup>, et l'Amazone, de sa confluence avec le Madeira, à Obidos avec une moyenne beaucoup plus élevée, de 18.2 ± 1.1 ng Hg l<sup>-1</sup>. Les valeurs obtenues dans le Madeira en basses eaux à l'amont et en hautes eaux pour sa partie aval, sont situées dans la moyenne mondiale, contrairement aux valeurs récemment publiées (Pfeiffer *et al.*, 1993) qui font état de teneurs beaucoup plus élevées, comprises entre 19 et 33 ng l<sup>-1</sup> (Nriagu *et al.*, 1992). La combinaison de techniques "ultra-propres" de prélèvement, de stockage et de traitement des échantillons, avec l'extrême sensibilité de la technique de fluorescence atomique permet de présenter des résultats fiables de mercure total dans les eaux naturelles (Cossa *et al.*, 1995) et donc de corriger les fortes valeurs publiées jusque-là.

Il est intéressant de relever que les teneurs en mercure dissous mesurées dans l'Amazone sont particulièrement élevées par rapport à la moyenne mondiale mais présentent l'avantage d'être parmi les premières publiées, limitant les possibilités de comparaison et d'interprétation. Dans les suspensions, les teneurs en mercure varient de 0.02 µg g<sup>-1</sup>, dans le bassin aval du Madre de Dios, à 2.13 µg g<sup>-1</sup>, dans l'Aripuana, confluent aval du Madeira. Leur répartition en fonction des matières en suspension (Fig. 3), des sous-bassins andins à l'Amazone à Obidos, suit une fonction de type exponentiel (Hg part. (µg g<sup>-1</sup>) = 3.433 × exp(-MES<sup>0.774</sup>); r<sup>2</sup> = 0.82; n = 33). La concentration moyenne en mercure particulaire contenu dans les eaux du bassin du Madeira est de 0.43 ± 0.39 µg g<sup>-1</sup> contre 0.54 ± 0.33 µg g<sup>-1</sup> dans les eaux de l'Amazone et de ses confluent en aval du Madeira. Dans les zones à forte activité minière, les teneurs mesurées dans les suspensions atteignent en moyenne, dans les sous-bassins miniers andins, 0.20 ± 0.10 µg g<sup>-1</sup> ce qui reste relativement faible puisque situé dans la limite supérieure de la moyenne mondiale (i.e. 0.1-0.19 µg g<sup>-1</sup>). Dans le Mutumparana et le Jaciparana, affluents du Madeira situés près de la frontière du Brésil et de la Bolivie et célèbres pour leur forte exploitation d'or alluvial, la moyenne mesurée, 0.87 ± 0.21 µg Hg g<sup>-1</sup>, dépasse près de 6 fois la moyenne mondiale; ces valeurs restent situées dans la même gamme que celle publiée par les auteurs brésiliens, soit 0.50 ± 0.13 µg g<sup>-1</sup> (Malm *et al.*, 1990).

Il apparaît ainsi que le mercure émis par les activités minières liées à l'exploitation de l'or ne contaminent pas tant les eaux de surface que les précédents auteurs ont pu le faire entendre car elle est surtout sensible dans les sédiments de

**Tableau 1** Concentrations en mercure total mesuré dans les phases dissoute et particulaire des eaux de surface du bassin du Madeira et de l'Amazone jusqu'à Obidos.

Code	Rivière	Alt. (m)	Temp (°C)	Cond ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	pH	MES ( $\text{mg l}^{-1}$ )	Hg dis. ( $\text{ng l}^{-1}$ )	Ecart-type (%)	Hg part. ( $\text{ng l}^{-1}$ )	Ecart-type (%)	Hg part. ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )	Hg total ( $\text{ng l}^{-1}$ )
A1	Zongo	4950	3.3	15.6	6.5	2.0	1.95	7.69	2.9	2.61	1.45	1.95
A2	Coroico	1250	20.9	28.5	6.8	4.6	5.80	0.00	1.2	1.63	0.25	5.80
A3	Coroico	660	21.9	51.0	7.0	6.8	9.35	3.74	2.2	1.28	0.32	9.35
A4	Challana	660	20.0	26.1	6.9	55.6	5.05	0.99	15.7	0.56	0.28	5.05
A5	Tipuani	650	20.2	41.4	6.8	338.0	3.80	0.00	15.7	0.56	0.05	3.80
A6	Mapiri	650	22.7	145.0	6.9	31.8	6.15	2.44	8.4	0.59	0.26	6.15
A7	Kaka	635	21.9	84.8	7.1	62.4	5.45	2.75	6.3	7.42	0.10	5.45
A8	Alto-Béni	400	22.0	228.0	7.1	69.8	5.30	3.77	16.5	0.17	0.24	5.30
A9	Béni	235	21.8	134.0	6.1	233.8	6.55	3.82	16.7	0.09	0.07	6.55
A10	Madre Dios	130	25.2	81.0	6.6	384.4	7.85	3.18	9.5	0.00	0.02	7.85
A11	Béni	130	24.8	154.0	6.5	167.0	6.30	0.00	13.4	0.80	0.08	6.30
A12	Orthon	130	25.6	68.2	7.1	127.6	6.05	2.48	12.1	0.03	0.10	6.05
A13	Béni	120	25.5	96.3	6.8	115.4	6.05	0.83	15.7	1.54	0.14	6.05
A15	Mamoré	120	25.6	62.0	7.0	50.8	3.10	0.00	10.1	0.49	0.20	3.10
A17	Abuna					14.4	6.70	1.49	13.0	0.42	0.91	6.70
A18	Madeira		24.6	8.4	5.9	80.8	4.60	0.00	8.6	0.09	0.11	4.60
A19	Mutum Par.		25.9	74.1	6.9	6	7.55	0.66	3.9	0.80	0.65	7.55
A20	Jacy Parana		22.9	6.3	6.7	5.4	5.55	0.90	5.8	0.20	1.08	5.55
A21	Madeira		24.8	11.2	6.9	121.6	5.80	0.00	12.0	0.44	0.10	5.80
A22	Candeias		26.5	72.8	7.3	12.2	6.50	1.54	8.5	0.08	0.70	6.50
A23	Jamari		25.8	9.0	7.2	5.2	5.40	0.00	6.4	0.53	1.23	5.40
A25	Machado		27.5	22.3	7.1	13.8	8.90	1.12	6.1	0.75	0.45	8.90
A27	Marmelos		26.8	5.4	6.2	2.8	5.65	0.88	3.8	0.67	1.35	5.65
A28	Madeira		27.6	24.0	6.8	149.2	8.50	1.18	19.3	0.43	0.13	8.50
A29	Aripuana		27.2	65.1	7.0	2.9	5.55	0.90	6.2	1.03	2.13	5.55
A31	Madeira		27.4	5.2	5.8	46.4	8.60	0.00	9.1	4.79	0.20	8.60
A32	Madeira		28.0	60.0	6.8	33.2	10.40	0.00	4.6	0.72	0.14	10.40
A33	Amazonas		28.4	15.2	6.7	56.6	8.55	0.58	15.2	0.08	0.27	8.55
A34	Uatuma		28.4	51.6	7.0	3.8	19.75	1.27	5.2	0.99	1.37	19.75
A35	Trombetas		28.0	48.3	7.0	5.0	7.05	2.13	2.5	0.80	0.50	7.05
A37	Amazonas		28.2	45.1	6.9	57.2	16.60	1.20	9.2	1.57	0.16	16.60
A38	Tapajos		27.8	39.5	6.8	2.6	18.25	0.27	1.0	4.26	0.38	18.25
	Madeira		Nriagu et al. (1992)					10-18		6-18		

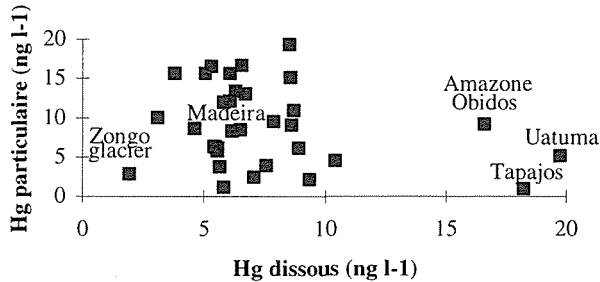


Fig. 2 Distribution du mercure dissous et particulaire (en  $\text{ng l}^{-1}$ ) dans les eaux du bassin du Madeira et de l'Amazone (MADEIRA 95).

fond où s'adsorbent et s'accumulent les particules contaminées. Cependant, une grande prudence s'impose quant à la potabilité des eaux dans les mines mêmes où nous avons relevé en Bolivie des teneurs en mercure total dépassant de 50 fois les teneurs normalement rencontrées, de  $1 \text{ ng l}^{-1}$ . Si l'hydrodynamique et la diminution des activités liées à la recherche d'or alluvial favorise le transport et la dispersion du mercure dans les eaux, en revanche, la contamination par le mercure peut ne pas être négligeable dans l'environnement proche des sites miniers (eaux potables, espèces de poissons comestibles, sédiments, etc.).

De manière globale, on a pu calculer les apports en mercure total par les différents tributaires étudiés. Il apparaît que le Madeira, avec un flux en basses eaux de  $17.06 \text{ kg Hg year}^{-1}$ , contribue à 6% des apports totaux par l'Amazone à Obidos ; la participation des Andes boliviennes, avec un apport journalier de  $0.51 \text{ kg Hg}$ , représente 3% des apports totaux par le Madeira. En comparaison, le Tapajos, caractérisé par sa richesse en matière organique, classé dans les "clearwater Rivers", participe à près de 5% aux apports totaux de mercure par l'Amazone à Obidos, avec un flux, en hautes eaux, de  $13.67 \text{ kg Hg day}^{-1}$ .

## CONCLUSION

Cette étude, en présentant la répartition longitudinale du mercure total contenu dans les phases dissoute et particulaire des eaux du bassin amazonien bolivien, en basses

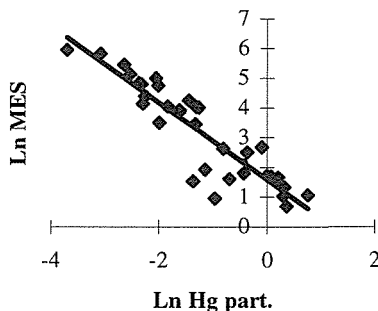


Fig. 3 Répartition logarithmique du mercure particulaire (en  $\mu\text{g g}^{-1}$ ) en fonction des matières en suspension dans les eaux du bassin du Madeira et de l'Amazone (MADEIRA 95).

eaux, et brésilien, en hautes eaux, permet :

- (a) de publier des teneurs en mercure dissous et particulaire fiables grâce à un protocole analytique “ultra-propre” et des techniques de mesure extrêmement fines adaptées aux gammes de concentrations rencontrées, et,
- (b) de relativiser l’importance du Madeira, considéré comme l’affluent le plus contaminé en mercure de tout le bassin amazonien, dans les apports totaux par l’Amazonie estimé en hautes eaux à 282.11 kg Hg day<sup>-1</sup>. En effet, les apports en mercure par le Madeira représentent 6% des apports à l’Amazonie à Obidos, participation relativement faible en comparaison du Tapajos, rivière dont l’activité minière est nulle mais qui atteint 5%.

Il apparaît que les zones caractérisées par une activité minière importante liée à la recherche d’or alluvial, présentent des teneurs en mercure dissous dans les eaux situées dans la moyenne mondiale, de 5.96 ng Hg l<sup>-1</sup> ± 1.43, et dans les suspensions de 0.20 ± 0.10 µg g<sup>-1</sup>, correspondant seulement aux maxima mondiaux. En revanche le Mutumparana et le Jaciparana, affluents du Madeira situés près de la frontière du Brésil et de la Bolivie et célèbres pour leurs activités minières, la moyenne mesurée dans les suspensions, 0.87 ± 0.21 µg Hg g<sup>-1</sup>, dépasse près de 6 fois la moyenne mondiale.

**Remerciements** Ce travail a été réalisé dans le cadre d’un programme commun ORSTOM/CNRS-INSU mené dans les grands bassins fluviaux intertropicaux. Nous remercions nos partenaires du DNAEE dont Valdemar Guimarães, sans qui cette campagne n’aurait pu avoir lieu, ainsi que nos collègues de l’Orstom, particulièrement Jean-Marie Fritsch, animateur de notre unité de recherche.

## REFERENCES

- Alhers, W. W., Reid, M. R., Kim, J. P. & Hunter, K. A. (1990) Contamination-free sample collection and handling protocols for trace elements in natural freshwaters. *Austral. J. Mar. Freshwater Res.* **41**, 713-720.
- Cossa, D., Sanjuan, J., Cloud, J., Stockwell, P. B. & Corns, W. (1995) Automated technique for mercury determination at sub-nanogram per litre levels in natural waters. *J. Anal. At. Spectrom.* **10**, 287-291.
- Coudrain-Ribstein, A., Héral, G., Bergeron, M. & Martinez, J. (1992) Analisis multi-elemental de agua : una herramienta para exploracion de oro. *Revista Boliviana de Quimica* **11**(1), 47-54.
- Gaudet, C., Lingard, S., Cureton, P., Keenleyside, K., Smith, S. & Raju, G. (1995) Canadian environmental quality guidelines for mercury. *Wat., Air and Soil Pollution* **80**, 1149-1159.
- Héral, G., Argollo, J., Fornari, M., Laubacher, G. & Viscarra, G. (1986) El distrito de Tipuani, geología e historia. *Khrysos* **2**, 9-15.
- Lacerda, L. D., Pfeiffer, W. C., Ott, A. T. & Silveira, E. G. (1989) Mercury contamination in the Madeira river, Amazon — Hg inputs to the environment. *Biotrop.* **21**(1), 91-93.
- LIDEMA (1993) Estudio de impacto ambiental por la explotacion de oro en la region de Nueva Esperanza, Araras, del departamento de Pando, La Paz, Bolivia. Liga de Defensa del medio ambiente.
- Malm, O., Pfeiffer, W. C., Souza, C. M. M. & Reuther, R. (1990) Mercury pollution due to gold mining in the Madeira river basin, Brazil. *Ambio* **19**(1), 11-15.
- Nolting, R. F. & De Jong, J. T. M. (1994) Sampling and analytical methods for the determination of trace metals in surface seawaters. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* **57**, 189-196.
- Nriagu, J. O., Pfeiffer, W. C., Malm, O., Souza, C. M. M. & Mierle, G. (1992) Mercury pollution in Brazil. *Nature, Lond.* **356**, 389.
- Pfeiffer, W. C., Lacerda, L. D., Salomons, W. & Malm, O. (1993) Environmental fate of mercury from gold-mining in the Brazilian Amazon. *Environ. Rev.* **1**, 26-37.
- Quémerais, B. & Cossa, D. (1995) Protocoles d’échantillonnage et d’analyse du mercure dans les eaux naturelles. *Environnement Canada — région du Québec, Conservation de l’Environnement, Centre Saint Laurent, Rapport scientifique et technique ST-31*.