

- URL du site web de votre labo/centre de recherches : <http://www.lmtg.obs-mip.fr/>
  - Votre discipline : Hydrogéochimie
  - Le cas échéant, titre de votre HDR : « Sur les traces du mercure au fil de l'eau : des Andes à l'Amazonie »
  - Date de soutenance : 11/06/2008
  - Sous la direction de : ...
  - Le cas échéant, URL de votre thèse sur TEL : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00288015/fr/>
  - Noms des fichiers joints à votre texte ; n'oubliez pas d'en préciser la **source** et la **nature** (cartes, photos, tableaux, sons, etc.) :
- 1- ...
  - 2- ...
  - 3- ...

# DANS L'AMAZONE, DU MERCURE : LE DEVELOPPEMENT CONTRAIRE D'UN CONTINENT ?

**Laurence MAURICE**

Université de Toulouse; UPS (SVT-OMP); Laboratoire des Mécanismes et Transferts en  
Géologie; 14 avenue Edouard Belin, F-31400 Toulouse, France  
IRD; LMTG; F-31400 Toulouse

**Directrice de Recherches IRD**

**Les activités humaines à la base du développement économique de l'Amazonie telles que les exploitations forestières et minières ou les activités agropastorales, favorisent la mobilisation du mercure vers des milieux aquatiques propices à sa méthylation. Le méthylmercure toxique peut alors être incorporé directement dans la chaîne alimentaire aquatique et s'accumuler dans les différents maillons pouvant atteindre des teneurs élevées en fin de chaîne, les poissons constituant une des principales sources protéiniques des populations de la région. Mais quelle est réellement l'incidence du mercure sur la santé de populations vivant dans des conditions précaires et elles-mêmes exposées à de nombreuses maladies endémiques ?**

L'Amazonie est ce fleuve majestueux qui traverse près de la moitié de l'Amérique du Sud, le plus grand fleuve du monde par son débit et la taille de son bassin versant, soit 6 millions de km<sup>2</sup> dont 64% au Brésil. Ce bassin est soumis à une forte pression anthropique depuis plusieurs siècles, avec un accroissement des activités humaines telles que l'exploitation forestière, les activités agricoles et minières, l'urbanisation, la construction de réservoirs hydroélectriques et de nouvelles routes. Sa colonisation a débuté dès le XVIII<sup>ème</sup> siècle, avec l'exploitation du bois dont le *pau brasil* qui a donné son nom au pays, puis la ruée vers l'or suivie de l'exploitation de l'hévéa dans la production massive de caoutchouc ; ces activités voient émerger de nouvelles villes au cœur de l'Amazonie associées à de fronts pionniers de colonisation. Aujourd'hui, plus de 62% de la population amazonienne est concentrée dans les villes sans avoir toujours accès à l'eau potable ou à l'électricité.

L'Amazonie abrite pourtant près d'un tiers des forêts tropicales et 10% des biotopes de la planète. Cette région est une des régions prioritaires dans la politique de développement menée au Brésil, en raison de ses sols propices aux activités agropastorales, de son potentiel hydroélectrique et de la diversité des espèces aquatiques commerciales. Les taux de déforestation associée à ce développement sont liés à l'explosion de la demande en agro-carburants, à la culture du soja qui couvre à elle seule 16 % de la surface déboisée de la forêt amazonienne ainsi qu'à l'élevage du bétail. Le potentiel commercial des poissons d'eau douce en Amazonie est estimé à environ 220 000 t.an<sup>-1</sup> et la demande nationale reste largement insatisfaite. Au Brésil, 86% de la production énergétique est d'origine hydroélectrique et la région amazonienne représente 40% du potentiel national. Ces chiffres

attestent de l'importance environnementale et économique de la région qui participe à 7% du PIB national, à la fois au niveau de l'Amérique du Sud mais aussi dans un contexte mondial.

Ces activités ont des conséquences directes sur les couvertures végétale et pédologique, et induisent des modifications du régime climatique local, régional jusqu'à global; les effets conjugués des changements climatiques et de l'occupation des sols influencent directement les processus de transfert des éléments chimiques et du mercure en particulier entre l'air, l'eau, les sols, les plantes et la chaîne trophique.

L'un des problèmes environnementaux majeurs d'actualité en Amazonie concerne la contamination par le mercure (Hg) des environnements atmosphériques et aquatiques ainsi que des populations riveraines. Sous sa forme organique, le méthylmercure ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ) présente une toxicité élevée et, en fonction de sa teneur dans l'organisme, peut affecter le système nerveux, rénal, et le développement moteur. Ses incidences sont particulièrement préoccupantes chez les personnes contaminées *in utero*. Si cet élément est un des plus étudiés par la communauté scientifique spécialisée, en revanche, il reste encore des zones d'ombre. Les rapports d'expertise sur le sujet (EPA US, 1997; IRD 2001; UNEP Chemicals, 2002) soulignent la présence et la persistance encore aujourd'hui du mercure dans tous les compartiments de l'environnement. L'Amérique du Sud prend ainsi la 2<sup>nd</sup>e place après l'Asie en tant que pollueur par Hg. Les premières études réalisées en Amazonie sur le thème du mercure, ont été orientées sur les régions minières (or et argent principalement) exploitées depuis l'époque coloniale (1550-1880) jusqu'à nos jours (Nriagu *et al.*, 1992). Le mercure est en effet utilisé dans les pratiques d'extraction aurifère pour sa propriété à s'amalgamer avec l'or en particulier. Le brûlage de l'amalgame permet aux orpailleurs de concentrer les particules d'or en libérant Hg sous forme vapeur dans l'atmosphère ou sous forme de fines gouttelettes sur le lieu même de l'extraction. Au cours de ces manipulations, 5 à 45 % du mercure est rejeté directement dans les rivières. Le reste s'évapore sous forme de mercure élémentaire dans l'atmosphère et finira par se redéposer avec les pluies ou les aérosols, après oxydation ( $\text{Hg}^0 \rightarrow \text{Hg}^{2+}$ ), puis contaminer l'environnement dans d'autres bassins que ceux d'émission. Il est important de souligner que les sites d'orpaillage au niveau amazonien peuvent être à l'origine de la mobilisation du mercure même en absence d'amalgamation: la très forte érosion des sols conduit, compte tenu de leur ancienneté et de leur richesse naturelle en mercure, à des apports importants de métal complexé aux matières en suspension, ces dernières étant responsables de la forte turbidité des eaux en aval des sites d'orpaillage et du transport du mercure sous forme particulaire. Dans le bassin amazonien comme en Guyane, la part respective de ces deux sources (amalgamation/érosion des sols) n'est pas connue.

- **L'Amazonie, convergence des facteurs de risque**

Si les premières études de contamination par le mercure en Amazonie se sont focalisées sur les sites d'orpaillage (Nriagu *et al.*, 1992; Malm, *et al.*, 1990; Pfeiffer *et al.*, 1993), en revanche, des études récentes ont montré l'importance des sources d'origine naturelle et antérieures aux activités humaines dans la région, par exemple, dans les concentrations élevées de Hg mesuré dans les sols tropicaux du bassin du Rio Tapajós (Roulet *et al.*, 1998). De par leur âge, les sols tropicaux peuvent présenter des teneurs en métaux lourds 10 fois supérieures à celles enregistrées dans les pays tempérés. Le processus d'érosion des sols anciens mis à nu par certaines pratiques agricoles telles que les cultures sur brûlis (Roulet *et al.*, 1999) ou de lessivage chimique de sols et roches de bassins du piémont andin, particulièrement important en saison des pluies (Maurice-Bourgoin *et al.*, 2000 et 2003) constituent des facteurs clés dans la perturbation du cycle naturel de Hg en Amazonie.

La seconde particularité de l'Amazonie est le rôle des lacs d'inondation et des lacs de barrage dans la transformation du mercure en ses formes organiques et donc toxiques, ou méthylation. Le mercure sorbé sur les particules fines transféré au fleuve Amazone et ses affluents ne présente pas de risque direct pour la santé humaine. En revanche, après transformation des espèces inorganiques de Hg en espèces organiques, cet élément devient particulièrement toxique. Les sols amazoniens disposent de réserves de ce métal qui dépassent largement celles qui sont attribuées à l'activité d'orpaillage. Les plaines d'inondation du bassin amazonien renferment de multiples sites à méthylation: lacs d'eaux libres, forêts inondées, prairies à macrophytes, lacs de méandres. Ces zones présentent des taux de méthylation qui sont en moyenne trente fois supérieurs à ceux mesurés dans les sédiments sous-

jacents ; principalement au niveau des racines adventives de certaines plantes aquatiques (Guimarães *et al.*, 2000). Cependant, la diversité biogéochimique et les conditions hydrodynamiques des lacs d'inondation du bassin amazonien ne permettent pas de généraliser ce risque. Nos études dans des lacs d'inondation d'eaux blanches et d'eaux noires le long du fleuve Amazone mettent en évidence une hétérogénéité du potentiel de méthylation suivant les caractéristiques géochimiques des lacs et le rôle limitant du manganèse, en particulier dans les lacs d'eaux blanches fortement poissonneux (Dutra Maia, 2008).

- **Quels risques pour les populations locales et le développement durable ?**

En Amazonie brésilienne, une série d'études sur les effets du méthylmercure dans le système nerveux des populations riveraines particulièrement dans la région du Tapajós, ont été réalisées (Lebel *et al.*, 1998 ; Dolbec and Fréry, 2001) et se poursuivent actuellement dans le cadre d'un programme de coopération entre le Canada et le Brésil (PLUPH) visant à déterminer les facteurs environnementaux favorisant l'émergence de la maladie de Chagas et de la contamination mercurielle dans cette même région du Tapajós. En revanche, le profil d'exposition des populations riveraines, dont le régime alimentaire est à base de poissons, montre que l'exposition à de faibles doses est constante (Lebel *et al.*, 1998 ; Dolbec *et al.*, 2001) et qu'elle commence *in utero* (Boischio et Cernichiari, 1998). Les conséquences neurologiques dans le cas d'une exposition *in utero* sont irréversibles et affectent le développement moteur et mental des individus exposés.

Des dernières études réalisées en Amazonie Bolivienne, il résulte que le principal problème de ces populations natives contaminées par le Hg réside dans le fait qu'elles sont sujettes à de nombreuses maladies endémiques (paludisme, fièvre jaune, dengue, etc...) et à des conditions de vie très précaires (parasitisme, anémie, HIV, etc...) ; elles sont généralement éloignées des centres de santé et soumises à de nombreuses agressions infectieuses. D'autres facteurs tels que la dénutrition globale, la déficience en micronutriments (fer, iode, zinc, calcium, vitamines diverses), certaines parasitoses, la santé des mères allaitantes et enceintes peuvent également interférer avec le bon développement neuromoteur et la croissance harmonieuse de l'enfant (Bénéfice *et al.*, 2006).

Dans ces conditions, l'interprétation causale et les recommandations sont délicates et difficiles et justifient une recherche pluridisciplinaire approfondie.

L'acquisition de nouvelles données et connaissances de la région amazonienne est particulièrement justifiée au moment de la mise en place de mesures de prévention et de suivi de paramètres environnementaux, comme dans les programmes de gestion et de contrôles environnementaux tels que le « Sistema Integrado de Vigilância da Amazônia » (Sivam) mis en place par le gouvernement brésilien. Cette initiative tente d'offrir les bases scientifiques au développement durable « en » Amazonie et non pas « de » l'Amazonie, telle que souhaitée par l'ancienne Ministre de l'Environnement Brésilien, Marina da Silva, elle-même de la région, qui doit en effet être appréhendée comme une mosaïque complexe de populations, en grande partie natives, et d'environnements naturels riches en diversité mais soumis à de fortes pressions anthropiques. A ce système d'observation environnementale, il manque un axe majeur de contrôle, c'est celui du suivi sanitaire à long terme des populations à risques, à la fois celles des utilisateurs du mercure (orpailleurs, vendeurs d'or, ...) et des communautés locales fortes consommatrices de poissons de la région. De nombreuses lacunes demeurent encore au sujet des effets sur la santé de l'exposition humaine à des faibles doses de contaminants ou même à une multi-exposition (métaux, virus, parasites, etc...).

*Projet de recherche actuel mené au LMTG (U. Toulouse) en collaboration avec le LCABIE (U. Pau) et le LCA (INPToulouse) : L'étude du fractionnement isotopique du mercure dans les principaux compartiments d'un hydrosystème peut-elle répondre au traçage des sources d'origines naturelle et anthropique et des processus de transformation de cet élément ?*

## Références bibliographiques

- Bénéfice E., Monroy S.L., Jimenez S. and López R., 2006. Nutritional status of Amerindian children from the Beni River (lowland Bolivia) as related to environmental, maternal and dietary factors. *Public Health Nutrition*, 9(3): 327-335.
- Boischio et Cernichiari, 1998. Longitudinal Hair Mercury Concentration in Riverside Mothers along the Upper Madeira River (Brazil). *Environ. Res.*, section A 77, 79-83.
- Dolbec J. and Fréry N., 2001. Contamination de poissons et exposition au méthylmercure des populations amazoniennes. In : *Le mercure en Amazonie : Rôle de l'homme et de l'environnement*, (Carmouze J.P., Lucotte M. and Boudou A., Eds.) IRD Publications (Expertise Collégiale), pp :321-345.
- Dolbec, J.; Mergler, D.; Larribe, F.; Roulet, M.; Lebel, J.; Lucotte, M. 2001. Sequential analysis of hair mercury levels in relation to fish diet of an Amazonian population, Brazil. *Sci. Total Environ*, 271, 87-97.
- Dutra Maia P., 2008. Le rôle des échanges entre le fleuve Amazone et la plaine d'inondation dans les processus de transport, de transfert et de spéciation du mercure. *PhD dissertation*, Université de Toulouse.
- EPA U.S., 1997. Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development, Washington, DC.
- Guimarães J.R., Meili M., Hylander L.D., Castro e Silva E., Roulet M., Mauro J.B.N and Lemos R.A., 2000. Net mercury methylation in five tropical floodplain regions of Brazil: high in the root zone of floating macrophyte mats but low in surface sediments and flooded soils. *Sci. Total Environ*, 261(1-3): 99-107.
- IRD, 2001. *Le mercure en Amazonie – Rôle de l'homme et de l'environnement*, (Carmouze J.P., Lucotte M. and Boudou A., Eds.) IRD Publications (Expertise Collégiale).
- Lebel, J., Mergler, D., Branches, F., Lucotte, M., Amorim, M., Larribe, F. and Dolbec, J., 1998. Neurotoxic effects of low-level mercury contamination in the Amazonian basin. *Environmental Research*, A79:20-32.
- Malm O., Pfeiffer W.C., Souza C.M.M. and Reuther R., 1990. Mercury pollution due to gold mining in the Madeira river basin, Brazil. *Ambio*, 19(1): 11-15.
- Maurice-Bourgoin L., Alanoca L., Fraizy P. and Vauchel P., 2003. Sources of mercury in surface waters of the upper Madeira erosive basins. *J. Phys. IV France*, 107:855-858.
- Maurice-Bourgoin L., 2001. Le mercure dans les eaux de surface du bassin amazonien – Transfert du mercure des sols aux milieux aquatiques – Spéciation, transport et sédimentation dans les rivières et plaines d'inondation. In : *Le mercure en Amazonie : Rôle de l'homme et de l'environnement*, (Carmouze J.P., Lucotte M. and Boudou A., Eds.) IRD Publications (Expertise Collégiale), pp. 167-201.
- Maurice-Bourgoin L., Quiroga I., Chincheros J. and Courau P., 2000. Mercury distribution in waters and fishes of the Upper Madeira rivers and mercury exposure in riparian Amazonian populations. *Sci. Total Environ*, 260: 73-86.
- Nriagu, J.O., Pfeiffer, W.C., Malm, O., Souza, C.M.M. and Mierle, G., 1992. Mercury pollution in Brazil. *Nature* (London), 356-389.
- Pfeiffer W.C., Lacerda L.D., Salomons W. and Malm O., 1993. Environmental fate of mercury from gold mining in the Brazilian Amazon. *Environ. Rev.*, 1: 26-37.
- Roulet, M.; Lucotte, M.; Canuel, R.; Rheault, I.; Tran, S.; Gog, Y. G. D.; Farella, N.; do Vale, R. S.; Passos, C. J. S.; da Silva, E. D.; Mergler, D.; and Amorim, M, 1998. Distribution and partition of total mercury in waters of the Tapajós river basin, Brazilian Amazon. *Sci. Total Environ.*, 231 : 203-211.
- Roulet, M.; Lucotte, M.; Farella, N.; Serique, G.; Coelho, H.; Passos, C. J. S.; da Silva, E. D.; de Andrade, P. S.; Mergler, D.; Guimaraes, J. R. D.; and Amorim, M., 1999. Effects of recent human colonization on the presence of mercury in Amazonian ecosystems. *Water Air Soil Pollut.*, 112 : 297-313.
- UNEP ; United Nations Environmental Programme - Chemicals: Geneva, 2002, pp 1-270.

