

Document public

Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane

Rapport d'exécution de missions de terrain

BRGM/RP-55614-FR
Juin 2007



Direction Régionale de l'Environnement
GUYANE



Géosciences pour une Terre durable

brgm



Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane

Rapport d'exécution de missions de terrain

BRGM/RP-55614-FR
Juin 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 - PDR05GUY02

P. Laporte, B. Joseph, P. Weng

Vérificateur :

Original signé par : François Blanchard

Date : 10 août 2007

Approbateur :

Original signé par : Philippe Weng

Date : 16 août 2007

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : Guyane, Mercure, Extraction aurifère, Poissons, Sédiments, Sites et sols pollués

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

V. Laperche, R. Maury-Brachet, Y. Dominique, G. Durrieu, F. Blanchard, J.C. Massabuau, L. Callier, P. Weng, H. Bouillard, B. Joseph et P. Laporte (2007). Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane – Rapport d'exécution de missions de terrain. Rapport BRGM/RP-55614-FR, Juin 2007. 60 pages, 20 illustrations, 7 tableaux.

Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane

Rapport d'exécution de missions de terrain

BRGM/RP-55614-FR
Juin 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005 - PDR05GUY02

P. Laporte, B. Joseph, P. Weng

Vérificateur :

Original signé par : François Blanchard

Date : 10 août 2007



Approbateur :

Original signé par : Philippe Weng

Date : 16 août 2007



Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Guyane, Mercure, Extraction aurifère, Poissons, Sédiments, Sites et sols pollués

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

V. Laperche, R. Maury-Brachet, Y. Dominique, G. Durrieu, F. Blanchard, J.C. Massabuau, L. Callier, P. Weng, H. Bouillard, B. Joseph et P. Laporte (2007). Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons de six fleuves de Guyane – Rapport d'exécution de missions de terrain. Rapport BRGM/RP-55614-FR, Juin 2007. 60 pages, 20 illustrations, 7 tableaux.

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. QUELLE EST L'ORIGINE DU MERCURE (Hg) EN GUYANE ?	7
1.2. QUELS SONT LES OBJECTIFS DE L'ETUDE EN COURS ?	8
2. Programme de cette étude et articulation avec le projet « Mercure » du CNRS 9	
2.1. LES GRANDS AXES DU PROGRAMME DE CETTE PRESENTE ETUDE.....	10
2.2. CONDENSE DU CAHIER DES CHARGES.....	10
3. Travaux réalisés, méthodes et principes adoptés dans cette étude	13
3.1. INVENTAIRE ET GEOREFERENCMENT DES SITES D'ORPAILLAGE.....	13
3.2. CHOIX DES AXES HYDROGRAPHIQUES ET MAILLE DE PRELEVEMENT.	15
3.3. PROTOCOLES D'ECHANTILLONNAGES ET D'ANALYSES DES SEDIMENTS	19
3.3.1. Réflexion préalable sur la granulométrie des sédiments à analyser dans cette étude régionale.....	19
3.3.2. Commentaires sur la variabilité des échantillons de sédiments.....	20
3.3.3. Prélèvement, échantillonnage et flaconnage des sédiments	21
3.3.4. Analyse des sédiments et contrôle.....	21
3.3.5. Choix des échantillons destinés à l'étude granulochimique	22
3.3.6. Résultats préliminaires.....	22
3.4. PROTOCOLE DE PECHE DANS LES RIVIERES ET D'ANALYSE DES POISSONS	31
3.4.1. Organisation.....	31
3.4.2. Filets	31
3.4.3. Pièges.....	31
3.4.4. Echantillonnage des muscles dorsaux des poissons.....	32
3.4.5. Méthode d'analyse	32
3.5. MISE EN ŒUVRE DES MISSIONS DE TERRAIN ET NOMBRE D'ECHANTILLONS PRELEVES.....	33
3.5.1. Moyens humains et matériels mis en œuvre	34
3.5.2. Dates et éléments des missions de terrain.....	36

3.5.3. Données complémentaires sur les différents secteurs pour les prélèvements de sédiments.....	40
3.5.4. Les trajets et l'avancement des campagnes d'échantillonnage.....	43
3.5.5. La collecte des sédiments	47
3.5.6. Difficultés relatives aux missions de terrain, solutions appliquées et conséquences	52
3.6. MISE EN PLACE DES BASES DE DONNEES INFORMATIQUES ET DU SIG.....	53
3.6.1. Pour les sites d'orpaillage.....	53
3.6.2. Pour les sédiments.....	53
3.6.3. Pour les poissons.....	53
4. Conclusions du rapport d'avancement	55
5. Bibliographie	57

Liste des Illustrations

Illustration 1 : inventaire des sites d'orpaillage (sources DRIRE, ONF et Gendarmerie).....	14
Illustration 2 : carte des secteurs couverts par l'échantillonnage des sédiments et des poissons	16
Illustration 3 : localisation des points de prélèvements des sédiments	17
Illustration 4 : localisation des lieux de pêche.....	18
Illustration 5 : corrélation entre les teneurs en mercure des sédiments obtenues par AAS-CV (ALS Chemex) et par AAS-pyrolyse (BRGM).....	23
Illustration 6 : teneurs en Hg dans les 1211 sédiments < 500 µm répartis sur l'ensemble de la Guyane.....	24
Illustration 7 : répartition en % de l'ensemble des teneurs en Hg dans les sédiments < 500 µm sur l'ensemble de la Guyane	26
Illustration 8 : teneurs en Hg dans les sédiments < 500 µm dans la zone de Dorlin jusqu'au fleuve Maroni	30
Illustration 9 : matériel mis en œuvre sur App1 et sur Mar2	35
Illustration 10 : (a) contournement des sauts (App2, St Canori) et (b) le passage des sauts (Mar2, crique Petit Abounamy).....	43
Illustration 11 : (a) encombrement des criques (Man2, crique Sophie) et (b) le niveau bas des eaux (Oya).....	44
Illustration 12 : (a) turbidité de l'eau (App2, crique Couata) et (b) les obstacles échaffaudés par les clandestins (Mar3, crique Petit Inini)	44
Illustration 13 : (a) aymara pris au filet (Oya3) et (b) Aymara pris à la trappe (Mar1)	46
Illustration 14 : (a) identification des poissons (Oya2) et (b) nettoyage des filets (App2)	46

Illustration 15 : (a) amas de feuilles et vase : Ech N° 1069 (App2), (b) Plage de vase à l'abri de troncs : Ech N° 1096 (App2), (c) Vase à l'abri d'une roche : Ech N° 1125 (App2) et (d) Vase dans végétation d'herbes basses : Ech N° 968 (Mar4)	48
Illustration 16 : (a) échantillon APP1098 et (b) MAR983.....	49
Illustration 17 : (a) échantillon MAR692 sur la crique Petit Inini et (b) échantillon APP1124 sur la crique Couata.	50
Illustration 18 : (a) échantillon APP1080 et (b) échantillon OYA802.....	50
Illustration 19 : (a) échantillon MAN537 et (b) échantillon APP1103	51
Illustration 20 : (a) échantillon COM10 sur le fleuve Oyac et (b) échantillon MAN1174 sur la crique Cokioco	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : comparaison des concentrations certifiées et mesurées en mercure total dans les échantillons biologiques certifiés	33
Tableau 2 : liste des prestataires retenus pour chaque secteur	34
Tableau 3 : dates des missions et nombre d'échantillons de sédiments prélevés	37
Tableau 4 : nombre de poissons et d'espèces pêchés par missions et par fleuve.....	38
Tableau 5 : nombre de poissons collectés par régime alimentaire et par fleuve	38
Tableau 6 : tableau récapitulatif des espèces de poissons collectées au cours du programme BRGM	39
Tableau 7 : tableau récapitulatif des Erythrinidae collectés au cours des programmes CNRS et BRGM.....	40

1. Introduction

En 1994, une étude menée par l'Institut de Veille Sanitaire (IVS) et l'INSERM révèle une contamination au mercure chez des populations d'Amérindiens Wayanas vivant dans des zones reculées de la Guyane, notamment le secteur du haut Maroni.

Suite à ce constat l'IVS, en collaboration avec l'INSERM et le CNRS, a mis en place deux études, l'une sur les risques chez l'enfant liés à la contamination par le méthylmercure (Cordier *et al.*, 2002), l'autre sur le risque alimentaire (Fréry *et al.*, 2001). Le principal objectif de cette seconde étude était de quantifier l'apport de mercure *via* l'alimentation et d'identifier les principales espèces de poissons potentiellement incriminables.

Des questions se posaient alors sur l'origine de ce mercure : naturelle ou anthropique ?

1.1. QUELLE EST L'ORIGINE DU MERCURE (Hg) EN GUYANE ?

On peut identifier deux sources du mercure en Guyane :

- l'une, d'origine naturelle, provenant du fond géochimique des sols tropicaux qui ont accumulé des quantités importantes de mercure issues notamment des apports atmosphériques résultant du dégazage de l'écorce terrestre et des océans. Il est fondamental de noter que l'âge important des sols tropicaux (plusieurs millions d'années), comparativement à celui des sols des régions tempérées, amplifie ce phénomène. Les sols tropicaux représentent donc d'importants réservoirs naturels de mercure inorganique divalent (Hg (II) métal lié à la matière organique et aux oxydes de fer) (Fitzgerald, 1989) ;

- l'autre, d'origine anthropique, provenant de l'extraction aurifère, source d'apports depuis 150 ans du fait des rejets directs lors du processus de l'amalgamation de l'or.

Le risque sanitaire induit par la présence du mercure dans les cours d'eau ne se situe pas directement au niveau de la qualité des eaux. En effet, les quantités de mercure présentes dans cette phase y sont très faibles (en dessous des normes de potabilité) et ne présentent aucun risque pour la consommation directe ou pour la baignade. De plus, 99 % du mercure présent dans l'eau l'est sous forme inorganique (Boudou *et al.*, 2006), forme peu biodisponible pour les organismes vivants.

Le risque sanitaire lié à la présence de mercure inorganique (divalent ou élémentaire) dans les cours d'eau est donc indirect et réside dans le fait que ce dernier peut, dans ce type d'écosystème, subir une transformation chimique : la méthylation ; réaction donnant naissance au méthylmercure (MeHg), forme la plus toxique de cet élément. Bien que des processus abiotiques (transfert de groupement méthyl de la matière organique au mercure) existent (Coquery *et al.*, 1994 ; Weber *et al.*, 1988), la méthylation du métal est essentiellement liée à l'action de bactéries anaérobies

(notamment les bactéries sulfato-réductrices et ferri-réductrices), présentes dans les zones anoxiques des cours d'eau (Compeau et Bartha, 1985 ; King *et al.*, 2002 ; Fleming *et al.*, 2006). La présence de ces zones anoxiques localisées à l'interface eaux - sédiment, mais également dans la colonne d'eau (plaines d'inondation, réservoir de barrage), apparaissent donc comme une condition *sine qua non* à la formation du MeHg et donc à la toxicité du métal pour les organismes vivants.

Le MeHg possède des propriétés chimiques (demie vie et rémanence importantes) qui, contrairement aux formes élémentaires et divalentes, lui permettent de se bioaccumuler, mais également de se bioamplifier de façon importante le long des réseaux trophiques aquatiques. Un facteur 10^6 à 10^7 est habituellement mesuré entre les concentrations en MeHg mesurées dans la colonne d'eau et celles relevées dans les poissons piscivores situés en fin de chaîne alimentaire : à titre d'exemple pour la Guyane, les niveaux de contamination en MeHg quantifiés dans la chair de l'espèce *Hoplias aimara* ou Aymaras peuvent être un million de fois plus élevés que ceux mesurés dans l'eau (Roulet et Maury-Brachet, 2001). D'autre part, il faut également souligner que si seulement 1 % du mercure total (HgT) mesuré dans la colonne d'eau et les sédiments sont sous forme méthylée, plus de 95 % du HgT présent dans le tissu musculaire des poissons piscivores est du MeHg.

Il apparaît aujourd'hui important d'évaluer, à l'échelle régionale, les concentrations en mercure dans les sédiments et les poissons.

1.2. QUELS SONT LES OBJECTIFS DE L'ETUDE EN COURS ?

L'objectif principal de cette étude est d'acquérir une information sur les concentrations en mercure total dans les sédiments vaseux et dans les poissons en échantillonnant ces milieux dans les bassins versants des rivières et fleuves de Guyane, notamment ceux concernés par l'extraction aurifère.

Dans les sédiments, le mercure total mesuré est composé de mercure inorganique et de méthylmercure dans des proportions variables et dépendant des conditions physico-chimique du milieu.

Dans les poissons, le mercure total mesuré est, comme nous l'avons exposé précédemment, essentiellement composé de méthylmercure (Maury-Brachet *et al.*, 2006).

L'ensemble des données analytiques « mercure » recueillies lors de cette étude, tant au niveau des sédiments que des poissons, sera conservé dans des fichiers constituant une base de référence dont les données sont calées sur un système de géo référencement homogène. Ceci permettra d'établir, à l'échelle de la Guyane, une carte de répartition des concentrations en mercure, laquelle sera utilisable par l'ensemble de la communauté guyanaise. Une réflexion pourra être engagée pour tenter de définir (si possible) une gradation des risques éventuellement encourus par les populations.

2. Programme de cette étude et articulation avec le projet « Mercure » du CNRS

La présente étude, relative à la « Répartition régionale du mercure dans les sédiments et les poissons des cours d'eau de Guyane », consiste à acquérir une information sur la distribution du mercure à une échelle géographique relativement vaste, puisqu'elle est à vocation régionale.

Elle a été conçue pour être complémentaire du programme de recherche scientifique « Mercure Guyane » (cf. CPER Phases II) dont les objectifs étaient les suivants :

Le projet de recherche "Mercure en Guyane – Phase II" (2002 à 2007), a été mis en œuvre en étroite complémentarité avec les travaux réalisés lors de la Phase I, il a eu pour objectif d'analyser les principales composantes du cycle biogéochimique du mercure en Guyane, depuis les sources naturelles et anthropiques, jusqu'aux transferts vers les populations humaines. L'échantillonnage des poissons collectés proviennent de trois des quatre axes développés au cours de ce programme :

- Axe 1 : l'objectif de cette étude était la réalisation d'un inventaire des niveaux de contamination par le mercure des principaux cours d'eau de Guyane, à partir d'un poisson piscivore *Hoplias aimara*, au niveau des zones habitées, conduisant à l'élaboration d'un système d'information géographique (SIG). Dans le cadre de cette étude, basée sur le bénévolat, plus de 100 kits d'échantillonnages ont été distribués auprès des centres scolaires, des dispensaires et des pêcheurs locaux ;
- Axe 2 : cette étude est basée sur analyse géochimique et écotoxicologique de la contamination mercurielle le long du *continuum* « Barrage de Petit-Saut – Fleuve Sinnamary – Estuaire ». Cette étude a permis de collecter des poissons le long de ce fleuve ;
- Axe 4 : les recherches développées à l'interface "Environnement/Santé" permettent d'étudier les transferts du mercure à partir des apports alimentaires (produits de la pêche) et les niveaux d'imprégnation des populations humaines. Les premières études ont été conduites en 1997 et 2005 au niveau des villages amérindiens du haut-Maroni, elles ont été complétées par des missions réalisées dans la zone amont de l'Oyapock (Camopi, Trois Sauts) en 2005 et 2006.

Au cours de ce programme CNRS (Phase II), 470 poissons de la famille des *erythrinidae* (soit deux espèces : *Hoplias aimaras* et *Hoplias malabaricus*) ont été prélevés sur les bassins versants du Maroni, de la Mana, du Sinnamary, de la Comté, de l'Approuague et de l'Oyapock. Le programme BRGM complète ce premier échantillonnage de poissons par des pêches, notamment en zones inhabitées, non explorées lors du programme CNRS, et par des prélèvements de sédiments vaseux.

La combinaison des connaissances acquises sur les processus par le programme du CNRS (comment et pourquoi le mercure devient-il biodisponible puis s'accumule-t-il dans les organismes vivants ?) avec les données couvrant une grande partie du territoire guyanais, recueillies par le projet BRGM (comment se répartit le mercure non organique *via* les vases transportées par les cours d'eau ?) devrait contribuer *in fine* à fournir une information sur les risques encourus par les populations humaines par rapport à la présence de mercure dans les cours d'eau étudiés.

2.1. LES GRANDS AXES DU PROGRAMME DE CETTE PRESENTE ETUDE

L'étude était organisée autour de trois axes de réflexion et d'actions :

- l'évaluation du fond géochimique en mercure dans les sédiments fins des principaux fleuves et rivières de Guyane, en distinguant les criques orpaillées de celles qui ne le sont pas : il s'agissait de réaliser des missions pour le prélèvement d'échantillons (environ 1100 envisagés) dont la teneur en mercure total a été ensuite déterminée ;
- l'estimation, en parallèle, de la mobilisation du mercure et son transfert vers la chaîne trophique : il s'agissait ici de réaliser des campagnes de pêche pour analyser les concentrations en mercure dans les différentes espèces de poissons pêchés (environ 500 à 600 envisagés), notamment l'aymara dont le régime piscivore le situe comme consommateur terminal. Les analyses de mercure total ont été effectuées dans la chair, prélevée dans le muscle dorsal ;
- la réflexion en cours pour la mise au point d'un outil de hiérarchisation des risques éventuels entre les divers bassins versants des cours d'eau étudiés, au moyen d'un Système d'Information Géographique. L'objectif est d'évaluer la possibilité d'identifier les zones aux risques potentiels les plus forts, où les populations humaines pérennes seraient susceptibles d'être exposées par suite de la consommation des produits de la pêche.

2.2. CONDENSE DU CAHIER DES CHARGES

La recherche, l'organisation et l'exploitation des données disponibles sont envisagées par bassins versants des six grands fleuves de Guyane : Approuague, Comté, Mana, Maroni, Oyapock et Sinnamary. L'acquisition des informations s'est faite selon deux types d'approches bien distinctes, d'une part au travers d'une collecte de données documentaires, cartographiques, et, d'autre part, par des prélèvements d'échantillons sur le terrain à des fins d'analyses.

Ces données ont ensuite été organisées dans des fichiers EXCEL constituant une base de données informatique utilisable *via* un Système d'Information Géographique (SIG), puis croisées entre elles afin d'appréhender les risques éventuels entre les divers bassins versants des cours d'eau étudiés.

Cela nécessite la mise en œuvre des tâches successives ci-après :

1. l'inventaire des sites actuels ou anciens connus ou présumés pour être, ou avoir été, le lieu d'extraction aurifère (jusqu'aux données disponibles fournies par la DRIRE relatives aux années 2005 et 2006). Tous ces sites doivent être géoréférencés selon un même système de repérage homogène pour tous les fichiers et identique avec les fichiers des données sur les sédiments et sur les poissons prélevés ;
2. le choix des axes hydrographiques drainant les zones orpaillées et ceux non concernés, *a priori*, par une activité minière ;
3. la mise au point des protocoles d'échantillonnage et d'analyses des sédiments et des poissons en s'inspirant de la démarche du CNRS ;
4. la mise en œuvre des campagnes de prélèvements, après des tests d'application des protocoles préalablement retenus, avec une recherche permanente des sites optimum de prélèvements, tant pour les sédiments fins vaseux que pour les poissons ;
5. l'interprétation des résultats analytiques sur les sédiments et les poissons et la mise en œuvre des contrôles analytiques ;
6. la mise en place de fichiers informatiques au format EXCEL constituant la base de données de référence, faciles d'emploi, utilisables soit indépendamment les uns des autres, soit croisés dans un SIG avec d'autres couches de données spécifiques à l'utilisateur ;
7. la mise en forme et l'exploitation de ces données dans un Système d'Informations Géographiques au format MAPINFO et ARCVIEW ;
8. la réflexion pour l'adaptation d'une méthode d'évaluation des risques à la problématique du mercure en Guyane, et si possible hiérarchisation des zones soumises à cette méthode et définition de zones sur lesquelles des investigations plus détaillées seraient souhaitables ;
9. la synthèse, les conclusions et le rapport final.

En complément de ce programme, le comité de pilotage a retenu (cf. compte rendu de la réunion de lancement de l'opération du 15 juin 2005) la mise en place d'une « page Internet » informative. Ce projet, non initialement prévu au cahier des charges, sera mis en ligne après concertation avec les services compétents.

3. Travaux réalisés, méthodes et principes adoptés dans cette étude

Les travaux de réflexion sur les aspects relatifs à la méthodologie et à la logistique ont pu commencer dès le mois d'avril 2005.

Le comité de pilotage s'est réuni plusieurs fois depuis le début de cette étude :

- le mercredi 15 juin 2005 : lancement officiel de l'opération ;
- et le jeudi 9 février 2006 : état d'avancement des travaux.

3.1. INVENTAIRE ET GEOREFERENCEMENT DES SITES D'ORPAILLAGE

Les fichiers des zones orpaillées connues tiennent compte de l'exploitation historique, passée, actuelle ou subactuelle (Illustration 1) :

- les couches BRGM Boutin (Placers 1^{er} cycle et placers 2^{ème} cycle) localisent les chantiers historiques (1852-1970) et les chantiers artisanaux avant 2000 ;
- la couche DRIRE situe tous les permis d'exploitation de 1998 à 2004 ;
- la couche « Anaconda » et « Gendarmerie » recense l'orpaillage clandestin depuis 2002 jusqu'en 2004 ;
- la couche ONF positionne les surfaces exploitées depuis 1999 et les sites clandestins en 2004 et 2005.

Les coordonnées initiales des sites étant repérées dans des systèmes différents selon les fichiers sources, et selon le système de repérage sur le terrain (en degré, minute et seconde, ou en degrés par longitude et latitude ou selon le système CSG 67 fuseau 21 ou fuseau 22) une homogénéisation a été faite selon le système WGS 84 fuseau Nord 22, afin de n'utiliser qu'un seul système de repérage pour tous les sites et cohérent avec les coordonnées des divers échantillons de sédiments et de poissons prélevés.

Le système WGS 84 fuseau Nord 22 est le plus proche du système RGFG 95 – UTM fuseau 22 pris en référence par le décret du 26 décembre 2000 portant application de l'article 89 de la loi du 4 février 1995 (modifiée) d'orientation pour l'aménagement et le développement du territoire. C'est pour cette raison qu'il a été pris comme référence dans les fichiers concernant cette étude, en lieu et place du CSG 67.

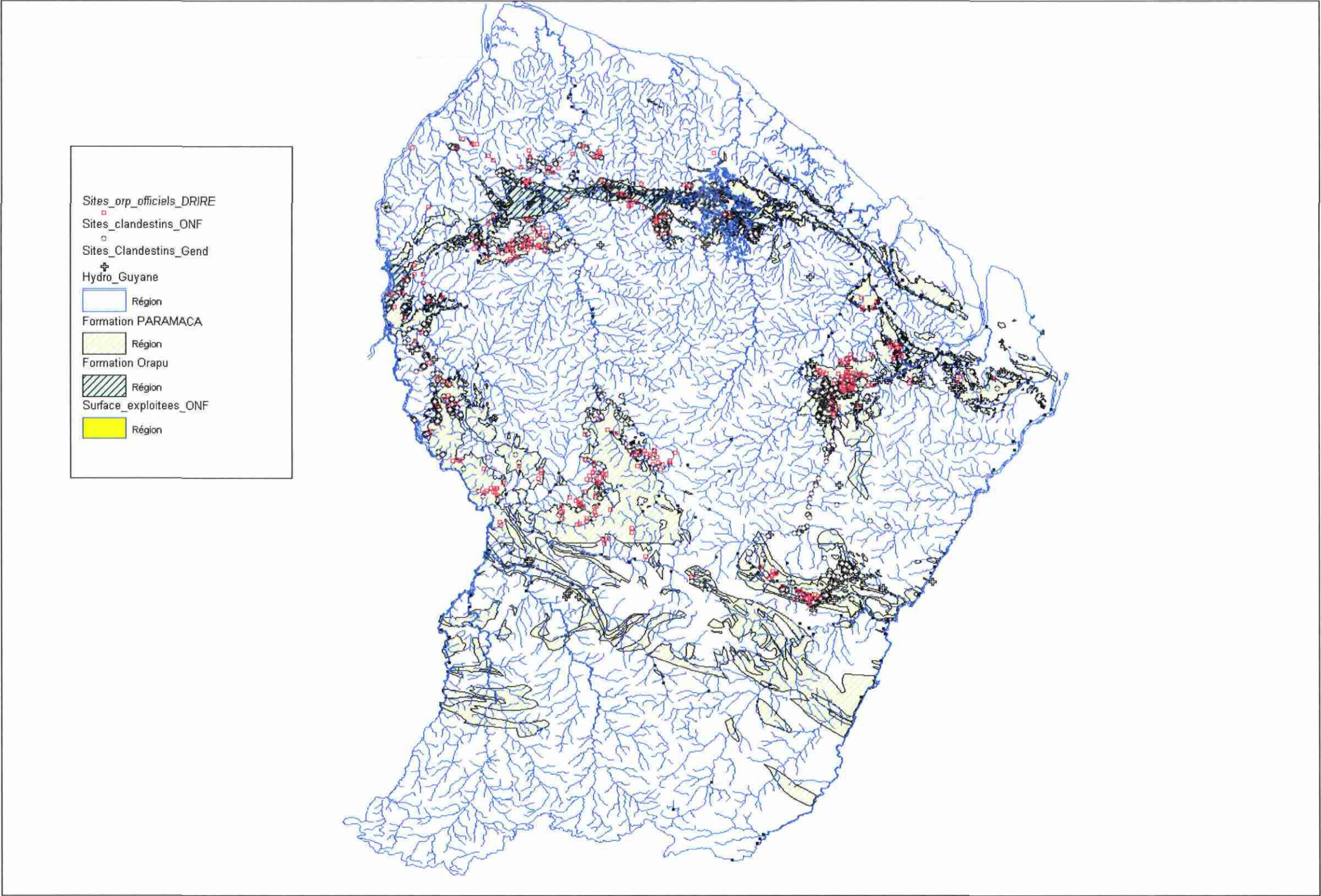


Illustration 1 : inventaire des sites d'orpaillage (sources DRIRE, ONF et Gendarmerie)

3.2. CHOIX DES AXES HYDROGRAPHIQUES ET MAILLE DE PRELEVEMENT

Les secteurs géographiques à couvrir dans le cadre de cette étude sont affichés sur une carte à petite échelle (Illustration 2). Ces secteurs couvrent une grande partie des axes hydrographiques de Guyane (navigables par un canot à moteur), y compris leurs affluents, qu'ils aient fait l'objet d'extraction aurifère ou non, afin de pouvoir distinguer le fond géochimique naturel des activités anthropiques.

Deux pas ont été principalement choisis : 1 et 5 km (Illustration 3). Le pas d'un kilomètre caractérise les zones d'intérêt accru (l'environnement des villages ou communes, la proximité des lieux d'orpaillage). Le pas de 5 km a été adopté lorsque l'un ou l'autre de ces critères ne se retrouve pas. Exceptionnellement, un pas de 10 km a été retenu dans les embouchures des grands fleuves, zone soumise généralement aux marées.

Les objectifs qui ont conduit au choix des différents pas sont les suivants :

- évaluation de la présence ou non de mercure au droit, en amont et en aval, des zones habitées (resserrement de la maille à 1 km) ;
- évaluation des sources potentielles du mercure : échantillonnage en aval des sites connus d'orpaillage, si possible au droit et en amont de ces sites ;
- évaluation de la diffusion du mercure sur les drains majeurs : maille régulière sur les grands fleuves, resserrement en amont et en aval des confluences avec des sources potentielles de mercure (même en l'absence de zones orpaillées proches) ;
- des critères propres à chaque secteur ont été retenus pour ajuster et compléter ces objectifs.

Un bassin peut comporter plusieurs secteurs : quatre sur le Maroni, trois sur l'Oyapock, deux sur l'Approuague. Les secteurs ont été définis sur des critères de logistique (durée de la mission, autonomie en carburant, lieu de départ et de repli), sur des critères socio-politiques et de la qualité des services (participation des diverses communautés aux missions du programme Mercure).

Des prélèvements de sédiments et de poissons (Illustration 4) ont aussi été faits dans des contextes géologiques (type granite par exemple) réputés sans potentiel aurifère et donc *a priori*, non orpaillés, pour contribuer à distinguer le fond géochimique naturel en mercure.

Les bassins versant des cinq fleuves Approuague, Comté, Mana, Maroni et Oyapock, retenus pour l'étude ont été découpés en 12 secteurs constituant autant de missions de terrain : Approuague (APP 1 et 2), Comté (COM 1), Mana (MAN 1 et 2), Maroni (MAR 1 à 4), Oyapock (OYA 1 à 3) (Illustration 2). Le secteur du Sinnamary n'est pas retenu dans le cadre de cette étude car déjà couvert par le projet du CNRS.

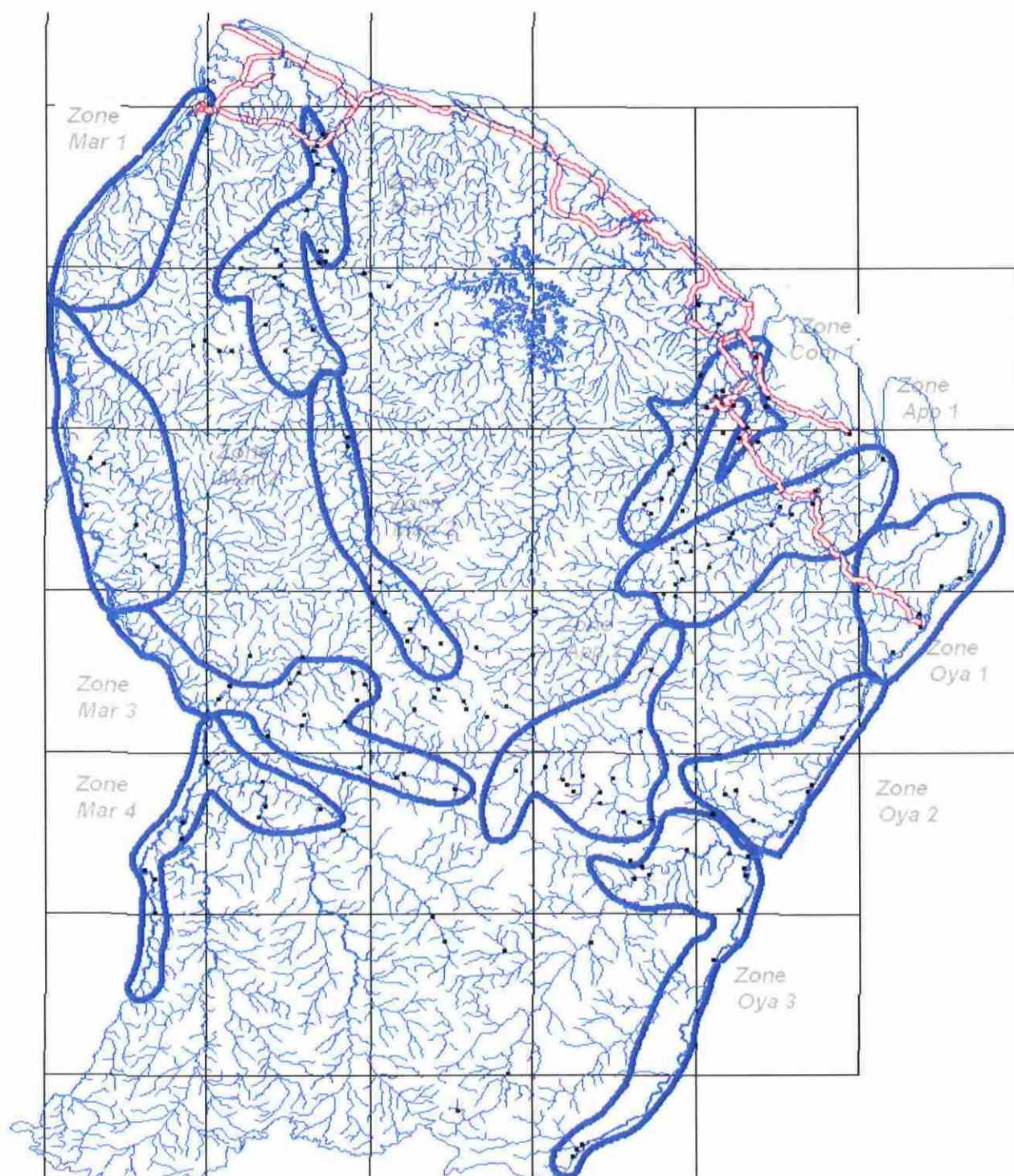


Illustration 2 : carte des secteurs couverts par l'échantillonnage des sédiments et des poissons

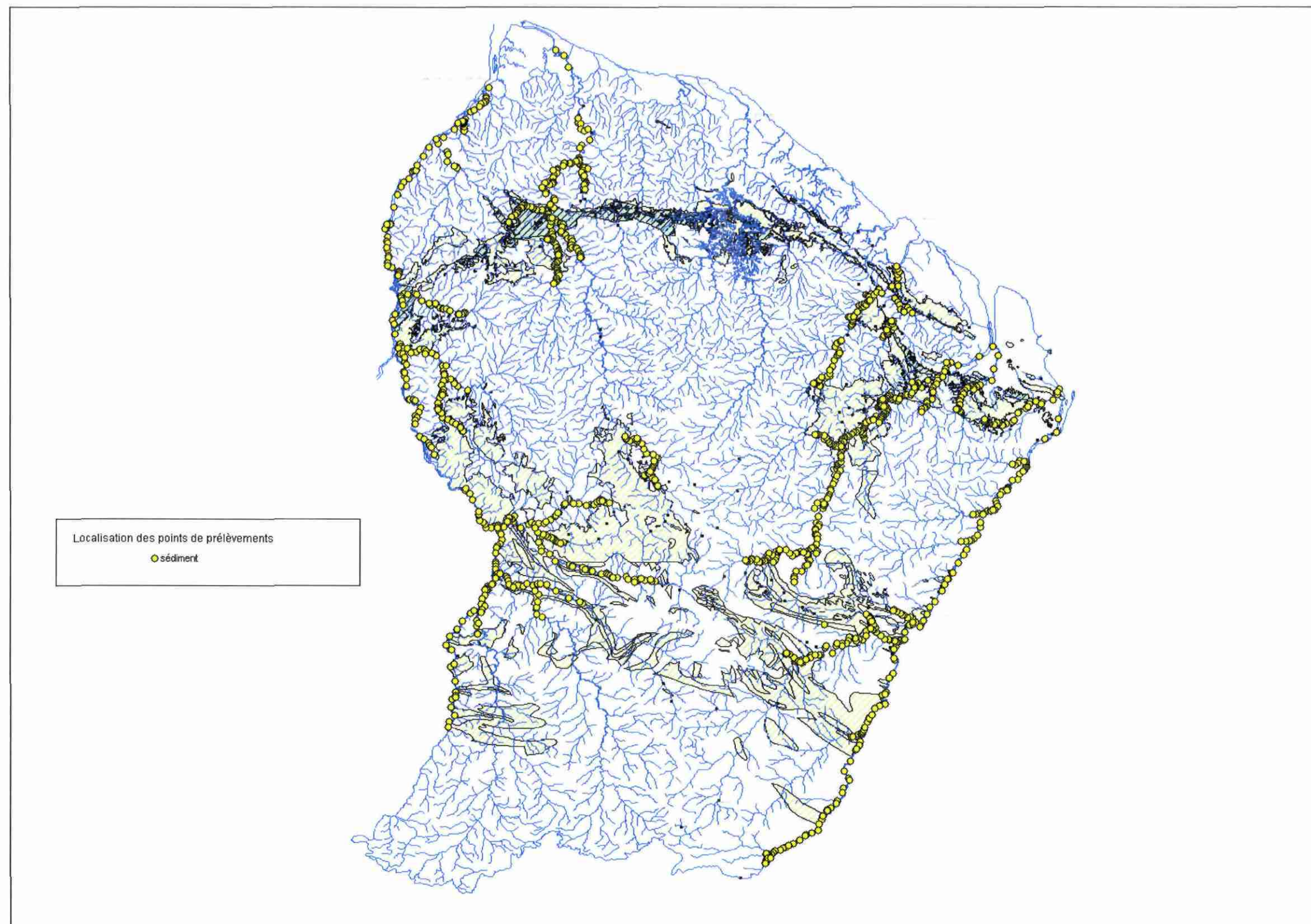


Illustration 3 : localisation des points de prélèvements des sédiments

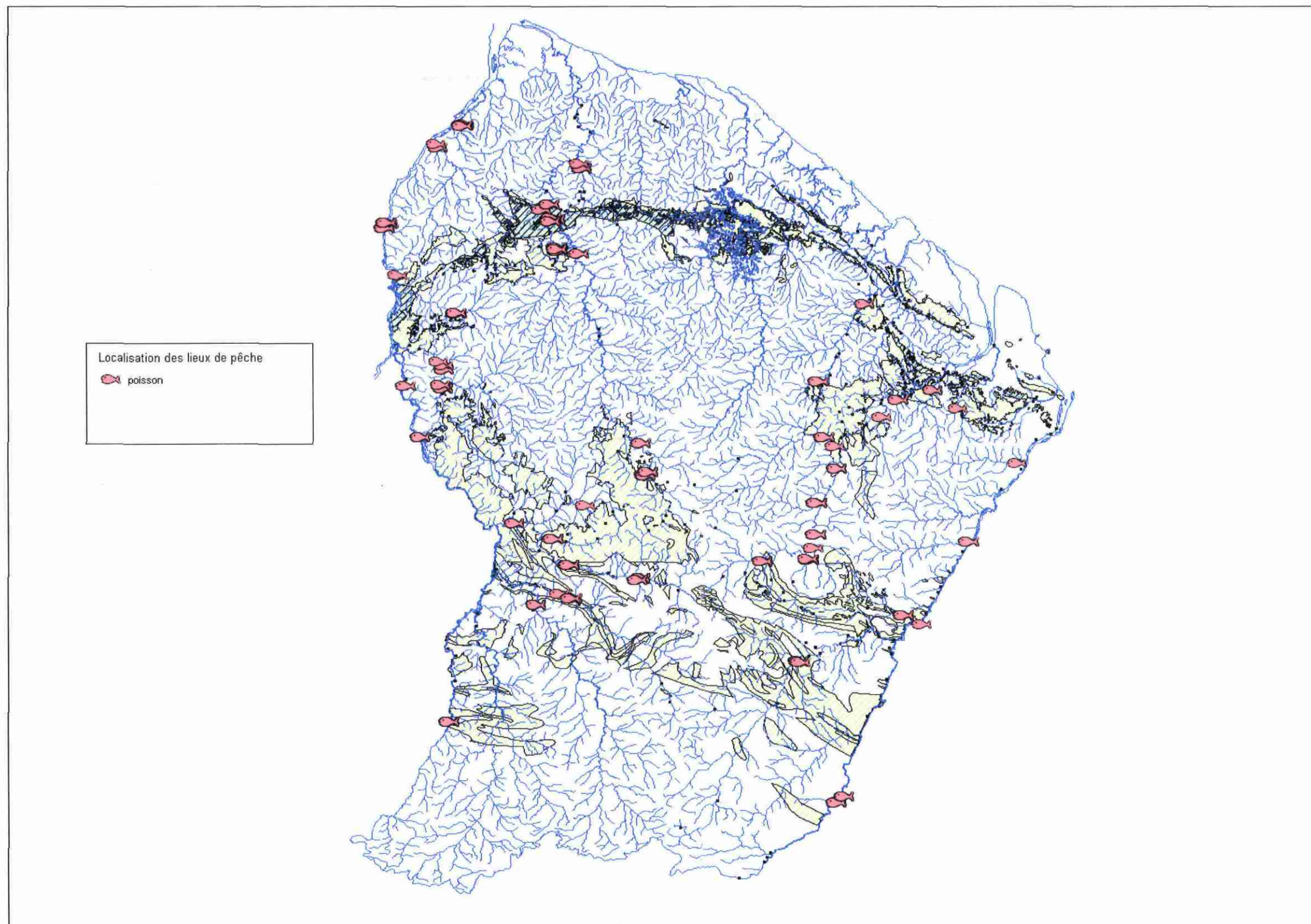


Illustration 4 : localisation des lieux de pêche

3.3. PROTOCOLES D'ECHANTILLONNAGES ET D'ANALYSES DES SEDIMENTS

3.3.1. Réflexion préalable sur la granulométrie des sédiments à analyser dans cette étude régionale

Il a été tenu compte du fait :

- que l'étude doit permettre d'évaluer, à l'échelle régionale de la Guyane, le fond géochimique en Hg dans les sédiments des principales rivières guyanaises avec pour objectif de distinguer la répartition naturel du bruit de fond dû aux activités anthropiques ;
- que la nature lithologique d'un sédiment est la résultante de toutes les particules arrachées aux sols environnants (matière organique, argiles, sables quartzeux ou non) qui ont pu se déposer en un lieu au fil du temps ;
- que le dépôt d'un sédiment est fonction de deux critères principaux :
 - o d'une part des "pièges morphologiques" (bras "morts", zones marécageuses inondables, racines d'arbres, tronc couchés, végétation, ...) sur le profil de la rivière ;
 - o d'autre part de la dynamique du courant qui le transporte, lequel est forcément variable, sur un même tronçon de rivière, en fonction des saisons et de la pluviométrie, et donc des crues qui ont un effet de chasse des particules les plus fines, et des périodes d'étiage plus favorables aux dépôts des vases fines. Ce mode de sédimentation variable dans l'espace et dans le temps, génère donc des dépôts constitués d'un mélange de particules dont la granulométrie est forcément hétérogène ;
- que d'après les études antérieures consultées : il apparaît que la majorité des travaux sur les sédiments de rivière est faite sur la totalité du sédiment prélevé sans tamisage sur site (Roulet *et al.*, 2000 ; Roulet *et al.* ; 2001 ; Lechler *et al.*, 2000 ; Heaven *et al.*, 2000 ; 2002 ; Warner *et al.*, 2005 ; Stoichev *et al.*, 2004). Le reste des travaux sur les sédiments de rivière montre qu'ils sont tamisés au laboratoire, la plupart des analyses sont faites sur des sédiments tamisés à 52, 63 ou 74 μm (Shi *et al.*, 2005 ; Bastos *et al.*, 2005 ; Filho et Maddrock, 1997 ; Hylander *et al.*, 2000 ; Domagalski, 2001 ; Pestana *et al.*, 2000 ; Rémy *et al.*, 2003 ; Ramirez Requielme *et al.*, 2003 ; Piani *et al.*, 2005) et le reste des analyses sont faites sur des échantillons qui sont soit tamisés à 200 μm ou 2 mm (Birkett *et al.*, 2002 ; Brüggmann, 1995) ;
- que l'analyse de la seule fraction fine du sédiment (63 ou 74 μm) pourrait augmenter artificiellement le « risque mercure » si le mercure est adsorbé préférentiellement sur les particules les plus fines des sédiments ou au contraire pourrait diminuer artificiellement le « risque mercure » si le mercure est adsorbé préférentiellement sur la matière organique liée à la fraction plus grossière.

Dans ce contexte de réflexion à l'échelle régionale de la Guyane, menée sur 16 mois et à des saisons différentes mais en dehors des hautes eaux, un nombre élevé d'échantillons de sédiments a été prélevé (1211). Ces échantillons de sédiments sont inévitablement, par nature et par mode de dépôt, des mélanges hétérogènes, tout en restant représentatifs des bassins concernés, le protocole suivant a été retenu :

- prélever dans les zones propices aux dépôts des sédiments fins vaseux, systématiquement recherchés au cours des missions ;
- analyser la fraction inférieure à 500 μm (seul critère d'homogénéité sur l'ensemble des échantillons prélevés) dans le but de s'affranchir des trop grandes disparités dues aux particules les plus grossières (débris de feuilles, brindilles, ...).

Cette maille inférieure à 500 μm a été retenue parce qu'elle représente la partie fine des sédiments prélevés : sables, limons, argiles et matière organique.

Des analyses granulochimiques plus détaillées sont actuellement en cours sur une sélection d'échantillons (~100) choisis à partir de cette première cartographie régionale.

Ce sont donc les résultats d'analyses de la composition chimique des sédiments inférieurs à 500 μm échantillonnés dans chaque lieu géo référencé qui figureront sur les cartes de chacun des douze secteurs étudiés.

3.3.2. Commentaires sur la variabilité des échantillons de sédiments

Compte tenu de la variabilité de l'échantillon de sédiment prélevé, dans le temps et dans l'espace, on peut considérer que :

- l'échantillon prélevé est représentatif, dans l'espace restreint du lieu d'échantillonnage, des divers apports du bassin versant concerné ;
- compte tenu des alternances des hautes et basses eaux au fil des saisons, l'échantillonnage réalisé n'a pas pu s'affranchir d'une proportion plus ou moins importante de particules quartzenses fines (peu propices à la fixation du mercure) dans le sédiment prélevé. Malgré le soin apporté au choix des sites de prélèvement, cela a donc généré une variabilité d'un échantillon à l'autre par dilution des concentrations en mercure dans certains échantillons où la fraction quartzense fine est importante ;
- pour limiter les effets de cette variabilité sur les sédiments, la réflexion est d'abord menée sur l'ensemble des 1211 échantillons prélevés sur l'ensemble de la Guyane, puis sur les 273 échantillons prélevés dans les criques non orpaillées, et enfin sur les échantillons prélevés dans les criques orpaillées en distinguant celles où l'orpaillage est ancien (102 échantillons) de celles où l'orpaillage est actuel et sub actuel (836 échantillons) ;
- une autre analyse a aussi été engagée à partir de la sélection des bassins de production d'or définis par divers critères (production d'or déclarée des sites officiels, surfaces orpaillées levées par l'ONF et nombre de sites clandestins repérés par la gendarmerie).

3.3.3. Prélèvement, échantillonnage et flaconnage des sédiments

La méthodologie de prélèvement des sédiments a été inspirée de l'expérience acquise par le programme CNRS en recherchant systématiquement, au cours des missions de terrain, les zones favorables aux dépôts de sédiments fins vaseux.

Il faut souligner que, hormis dans les bas cours d'eau (influencés par les marées) des cinq grands fleuves étudiés, les dépôts de vases fines s'avèrent plus difficiles à trouver que les zones sableuses largement répandues (observation macroscopique tant à l'échelle des fleuves et que des affleurements). Par conséquent, la démarche sélective qui consiste à rechercher préférentiellement les affleurements vaseux contribue, à privilégier la cartographie des zones les plus potentiellement porteuses du mercure adsorbé sur les particules fines des vases (chargées en matières organiques et argiles), par rapport à l'ensemble des autres affleurements de sédiments déposés par les fleuves guyanais.

Des échantillons de sédiment ont été prélevés à la faveur de « pièges à vase », soit en surface affleurante des berges plates, soit sous une tranche d'eau généralement de faible épaisseur. Ils sont ensuite conditionnés dans des flacons de 500 ml en polyéthylène (PE). Ces flacons d'échantillons bruts sont conservés à Cayenne dans une pièce climatisée.

Des échantillons de sédiment ont aussi tamisés à 500 μm sur le site de prélèvement. Ils ont ensuite été conditionnés dans des flacons de 250 ml en polyéthylène (PE) pour être expédiés au laboratoire du BRGM à Orléans sous un délai maximum d'une semaine. Ils sont conservés en chambre froide.

3.3.4. Analyse des sédiments et contrôle

Dès leur réception, les 1211 échantillons ont été homogénéisés manuellement avec une spatule. Environ 30 g d'échantillon sont placés dans une boîte de pétri en plastique mise dans une étuve à 40 C pendant au moins 3 jours. Les échantillons sont ensuite broyés puis stockés dans des tubes en plastique jusqu'à leur analyse par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA).

L'analyse de Hg total est réalisée, sur l'échantillon, par SAA équipée d'un four à 800°C (LUMEX RA-915⁺), avec une limite de quantification, du mercure total, de 10 ng g⁻¹ pour une masse de 200 mg d'échantillon.

Au cours des analyses, des échantillons de rivière certifiés sont utilisés pour valider la méthode :

- NCS DC78301 à 220 $\pm$ 40 ng g⁻¹ en provenance du China National Analysis Center for Iron and Steel ;
- LGC6156 à 10,1 $\pm$ 1,6 $\mu\text{g g}^{-1}$ en provenance du Laboratory of the Government Chemist pour Setting Standard in analytical science, Grande-Bretagne.

De plus, environ 10 % des échantillons ont été sélectionnés en fonction de leur teneur en Hg pour être envoyés à un laboratoire externe (ALS Laboratory Group, Canada) pour contrôler la qualité des mesures faites avec la SAA du laboratoire.

La spéciation du mercure n'a pas été retenue dans le cahier des charges de ce projet, car elle nécessite un mode spécifique d'échantillonnage et de conservation des échantillons, lourd et difficile à mettre en œuvre sur des missions itinérantes à vocation régionale. Une démarche qui consisterait à établir la spéciation du mercure dans les sédiments pourrait cependant être envisagée dans une phase spécifique ultérieure sur des secteurs sélectionnés sur la base des résultats de l'étude en cours.

3.3.5. Choix des échantillons destinés à l'étude granulochimique

A partir des résultats analytiques acquis sur les 1211 échantillons prélevés sur les cinq fleuves testés, 100 échantillons ont été sélectionnés après une réflexion menée sur les divers contextes de prélèvement (crique orpaillée ou non, ...) et sur leurs textures.

L'objectif des granulochimies est d'étudier la distribution du Hg selon trois classes granulométriques (500-200 μm , 200-63 μm et < 63 μm) afin d'étudier l'adsorption préférentielle du Hg sur certaines phases organiques ou/et minérales.

3.3.6. Résultats préliminaires

Analyses de contrôle

Les 100 échantillons sélectionnés pour les analyses granulométriques ont aussi été envoyés à un laboratoire extérieur (ALS Chemex, Canada) pour des analyses de contrôle. La méthode utilisée par ALS Chemex est différente (Spectrométrie d'absorption atomique - vapeurs froides) de la méthode du laboratoire du BRGM (Spectrométrie d'absorption atomique – pyrolyse). Même si les méthodes analytiques sont différentes, les résultats sont bien corrélés avec un facteur de corrélation de 0,96 (Illustration 5). Malgré ce bon facteur de corrélation, l'examen des résultats semble montrer que la méthode AAS-CV par rapport à la méthode AAS-pyrolyse donne des teneurs en Hg supérieures de 10-15 % pour les sédiments dont les teneurs sont inférieures à 100 ng g⁻¹.

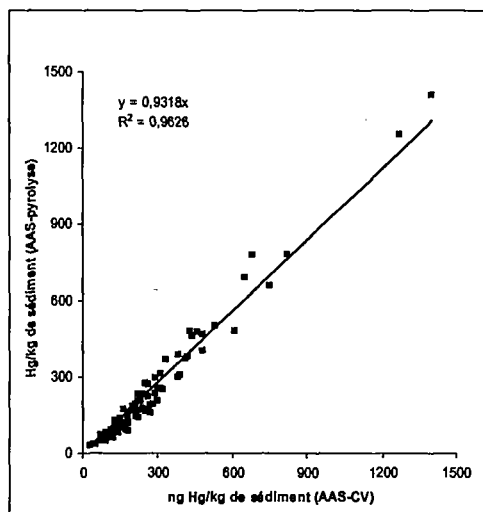


Illustration 5 : corrélation entre les teneurs en mercure des sédiments obtenues par AAS-CV (ALS Chemex) et par AAS-pyrolyse (BRGM) teneurs exprimées ng/g

Résultats des 1211 sédiments < 500 µm

L'étude granulométrique sur une centaine d'échantillons étant en cours, l'interprétation des résultats sur les sédiments < 500 µm semble encore prématurée. C'est pourquoi, les résultats des sédiments < 500 µm sont présentés sous forme de cartes et d'histogramme (Ill. 6 à 8) mais que seules les tendances observées sont présentées sans rentrer dans le détail de chaque analyse. L'interprétation complète sera donnée dans le rapport final (09/2007) en prenant en compte les résultats granulochimiques (importance relative de la matière organique et des phases minérales qui conditionnent l'interprétation des valeurs brutes présentées ici.

Afin de présenter l'ensemble des 1211 teneurs en mercure, il est nécessaire de définir des classes à partir de l'estimation d'un fond géochimique. Deux zones sont seulement présentées ici afin d'illustrer la méthodologie qui sera appliquée sur tous les bassins (Illustration 6). Le fond géochimique sur la rivière Litany en amont d'Antecume Pata a été estimé à partir de 28 échantillons, la teneur moyenne en mercure est de $118 \pm 26 \text{ ng g}^{-1}$. Le fond géochimique sur le Haut Oyapock en amont de la crique Yaloupi (au sud du village d'Oscar) a été estimé à partir de 50 échantillons, la teneur moyenne en mercure est de $99 \pm 30 \text{ ng g}^{-1}$. A partir de ces moyennes, il a été possible d'estimer un fond géochimique d'environ 100 ng g^{-1} avec un maximum de 150 ng g^{-1} . Ces valeurs ont permis de classer les échantillons en 21 classes (Illustration 7), chaque classe à la même taille (un pas de 50 ng g^{-1}). Environ 94 % des échantillons sont répartis dans les 5 premières classes ($0 \text{ à } < 50 \text{ ng g}^{-1}$: 8,5 % ; $50 \text{ à } < 100 \text{ ng g}^{-1}$: 28,6 % ; $100 \text{ à } < 150 \text{ ng g}^{-1}$: 33,0 % ; $150 \text{ à } < 200 \text{ ng g}^{-1}$: 16,3 % ; $200 \text{ à } < 250 \text{ ng g}^{-1}$: 7,4 %) dont 70 % des échantillons ont une teneur en mercure inférieure à la teneur maximale du fond géochimique estimé. Seuls trois échantillons (0,25 % de l'ensemble des échantillons) ont une teneur en mercure supérieure au mg kg^{-1} .

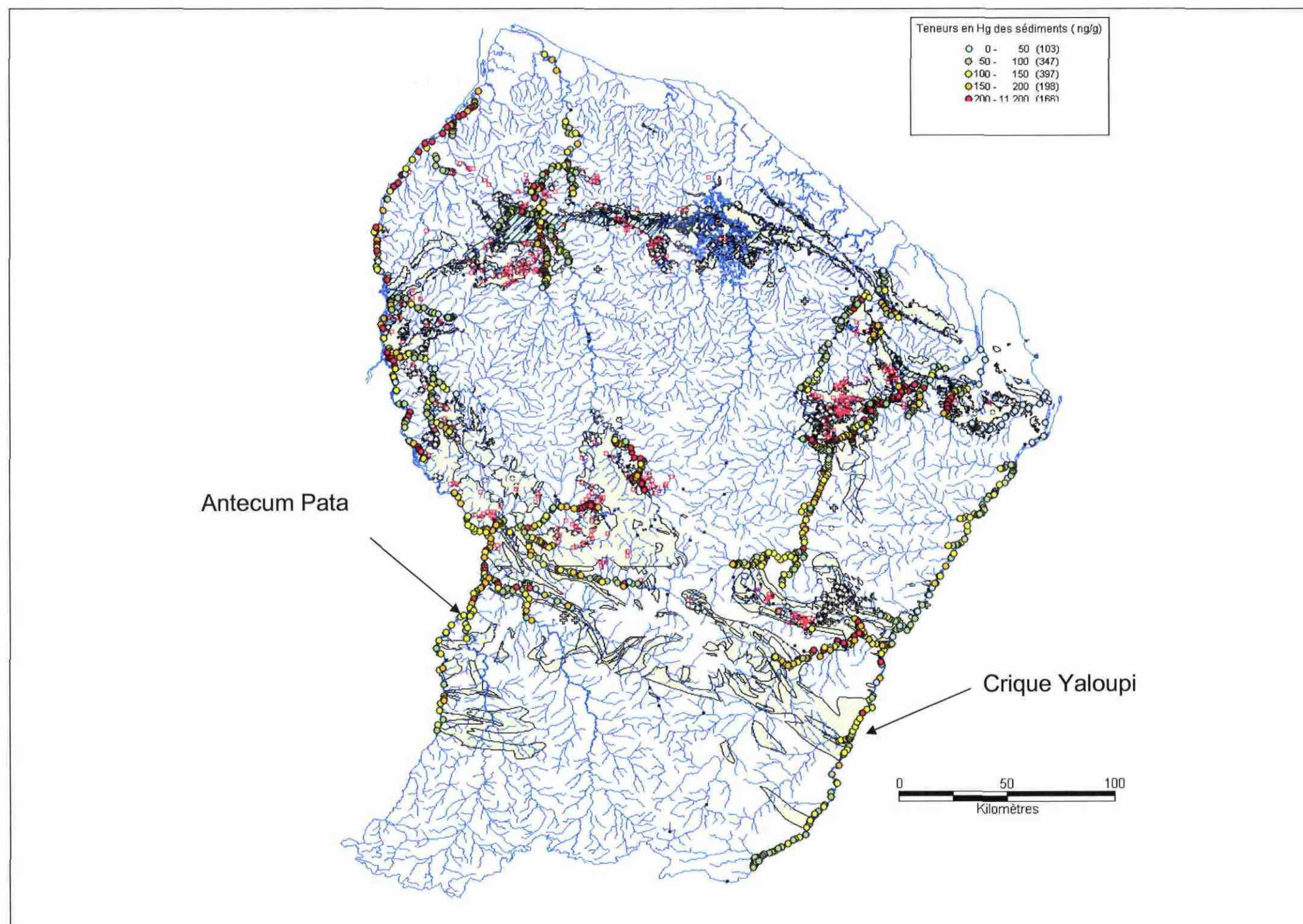


Illustration 6 : teneurs en Hg dans les 1211 sédiments < 500 µm répartis sur l'ensemble de la Guyane

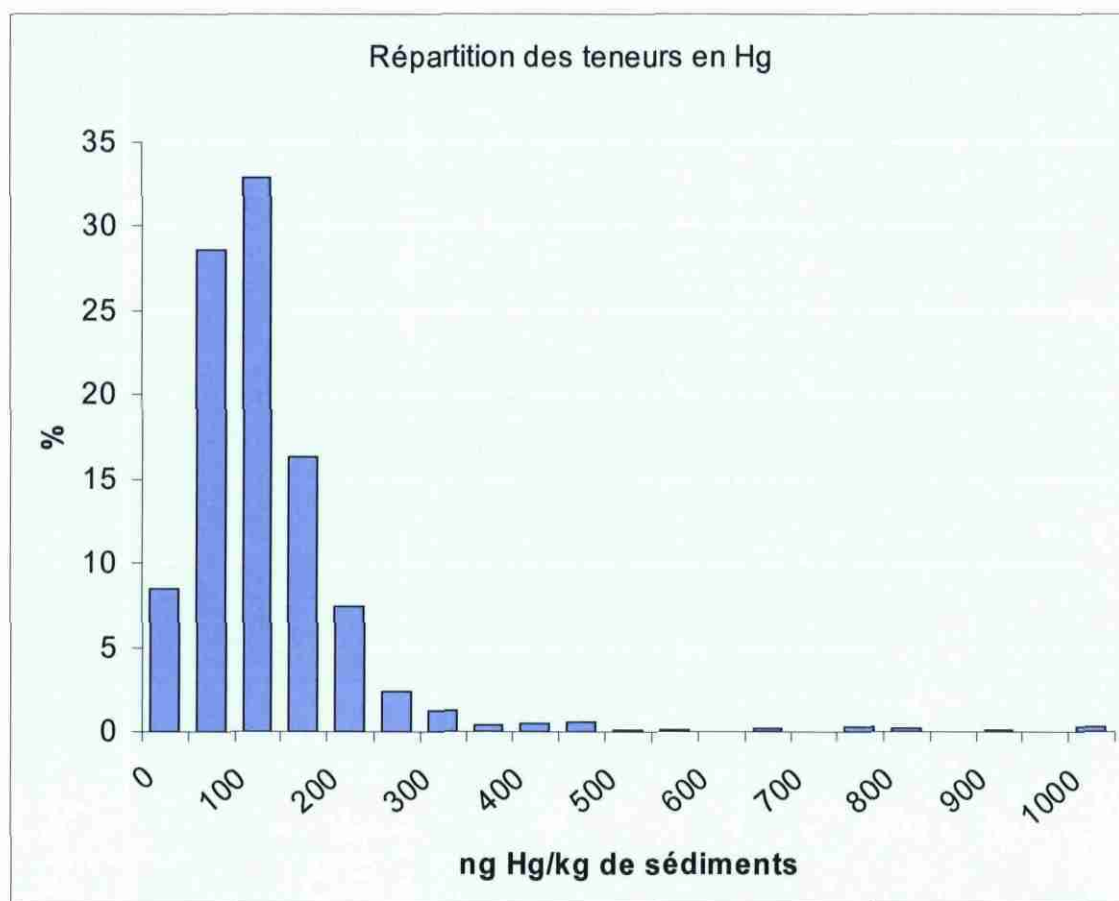


Illustration 7 : répartition en % de l'ensemble des teneurs en Hg dans les sédiments < 500 µm sur l'ensemble de la Guyane. Teneurs exprimées en ng/g

L'Oyapock

Le fleuve Oyapock peut être divisé en trois secteurs :

- le haut Oyapock de Trois Sauts à la crique Yaloupi au Sud du village d'Oscar correspond à un secteur non orpaillé présentant des teneurs en mercure inférieures à 150 ng g⁻¹ ;
- le moyen Oyapock du Nord de la crique Yaloupi (côté brésilien, présence d'une crique orpaillée : crique Apamari) jusqu'à Maripa. Toute cette zone est ou a été orpaillée. Il y a l'orpaillage actuel sur la rivière Camopi où des teneurs élevées en mercure ont été mesurées près des chantiers d'orpaillage (ex : 652 ou 775 ng g⁻¹). Certaines valeurs fortes ont été mesurées sur le fleuve Oyapock entre Camopi et Saut-Maripa, cette zone n'est pas actuellement orpaillée mais il y a eu jusqu'à 50 barges en activité dans les années 1980 ;

- le bas Oyapock de Saut-Maripa à l'estuaire correspond à une zone non orpaillée côté français et un peu orpaillée côté brésilien. Les teneurs en mercure sont inférieures à 150 ng g^{-1} . Les teneurs en mercure sont encore plus faibles au Nord de Nouvelle Alliance (inférieures à 40 ng g^{-1}) qui correspond à la limite des dépôts de vase marines en provenance de l'Amazone.

L'Approuague

Comme pour l'Oyapock, le fleuve Approuague peut être divisé en trois secteurs :

- le haut Approuague a été anciennement orpaillé mais il l'est plus faiblement aujourd'hui. Dans cette zone, les teneurs en mercure ne dépassent pas les 200 ng g^{-1} , mais localement des valeurs fortes ont été mesurées et ont pu être expliquées par la présence de barges (ex : échantillon à 1320 ng g^{-1} près de la crique Sapokai) ;
- le bas Oyapock de Arataïe à Régina correspond à une zone fortement orpaillée depuis de nombreuses années. Des valeurs fortes ont été mesurées sur l'ensemble du collecteur dues à la présence de nombreuses dragues et de criques orpaillées le long du collecteur. C'est dans la zone la plus pépétique de la Guyane (Impératrice) que les deux teneurs les plus anormales ont été mesurées (supérieures à 10 mg g^{-1}) ;
- la zone de Régina à l'estuaire correspond à un secteur non orpaillé. Les teneurs en mercure sont inférieures à 100 ng g^{-1} . Elles sont encore plus faibles au Nord (inférieures à 40 ng g^{-1}) qui correspond à la zone de dépôts des vases marines.

La Comté

Le secteur de la Comté correspond à deux rivières principales : la Comté et l'Orapu. Quelle que soit la zone, les teneurs moyennes en mercure des 105 échantillons collectés sont inférieures au fond géochimique estimé. Environ 10 % des échantillons ont une teneur en mercure supérieure à 150 ng g^{-1} . Les échantillons collectés dans les criques non orpaillées montrent clairement des teneurs en mercure inférieures à celles des criques orpaillées (Valeurs médianes : 74 ng g^{-1} et 135 ng g^{-1} respectivement).

La Mana

Le fleuve Mana peut être divisé en deux secteurs distincts, séparés par une zone granitique non échantillonnée car difficile d'accès à cause des nombreux sauts et peu propice à l'échantillonnage (zone non aurifère avec peu de dépôt de vase) :

- la haute Mana est une zone très orpaillée (nombreux placers : Repentir, Dégrad Saint Léon, Dagobert...). Environ 65 % des échantillons ont une teneur en mercure supérieure à 150 ng g^{-1} ;
- le secteur de la basse Mana est aussi une zone fortement orpaillée, principalement, la rivière Arouany et le fleuve Mana de l'Arouany jusqu'à la rivière Cokioco et Corocibo qui sont plus faiblement orpaillées (Valeurs médianes : 82 ng g^{-1} et 93 ng g^{-1} respectivement). Les valeurs les plus faibles (sur l'ensemble des 1211 données) ont été mesurées en amont de la rivière Arouany (inférieures à 10 ng g^{-1}). Ces valeurs augmentent rapidement en aval au niveau du placer Délices ($\sim 500 \text{ ng g}^{-1}$).

Le Maroni

Le cas du fleuve Maroni est différent de celui du fleuve Oyapock car, tout au long du Maroni (de l'amont (Litany) vers l'estuaire), de nombreuses criques orpaillées viennent alimenter ce collecteur en plus de la présence importante de barges sur le fleuve. Ainsi, les teneurs en mercure (valeurs médianes) augmentent de l'amont vers l'aval et sont respectivement de 121 ng g^{-1} (Litany), 163 ng g^{-1} (Lawa) et 209 ng g^{-1} (Maroni) :

- le secteur allant de l'amont à Antecume Pata correspond à un secteur non orpaillé en zone française mais la crique Oulémali (très gros affluent côté Surinam) fait l'objet d'exploitations. Les teneurs en mercure mesurées dans les sédiments sont inférieures à 150 ng g^{-1} ;
- le secteur de Maripasoula avec les rivières orpaillées d'Ouaqui, du Grand Inini et du Petit Inini correspond à une zone entièrement orpaillée. Environ 50 % des teneurs en mercure mesurées sont supérieures à 150 ng g^{-1} . L'exemple du Petit Inini est intéressant (Illustration 8) pour illustrer l'impact d'un placer comme Dorlin. Tous les échantillons analysés sur le placer et en aval du placer (jusqu'à environ 7 km) montrent des teneurs supérieures à 200 ng g^{-1} , puis sur les 25 km suivants, ces teneurs sont plutôt comprises entre 150 et 200 ng g^{-1} , pour ensuite être comprises entre 100 et 150 ng g^{-1} sur les 25 derniers kilomètres. Cette constatation doit bien sûr être prise avec précaution car il est encore nécessaire d'estimer l'impact des différentes criques alimentant le Petit Inini ;
- la zone du Grand Santi correspond à deux secteurs distincts : le collecteur principal avec le Maroni et la Lawa et le secteur avec les rivières de Beïman, du Grand Abounamy et du Petit Abounamy. De nombreuses barges sont présentes sur le collecteur principal et 94 % d'échantillons collectés dans ce secteur ont une teneur en mercure supérieure à 150 ng g^{-1} . A l'opposé, moins de 4 % des échantillons collectés sur les rivières anciennement orpaillées ont une teneur en mercure supérieure à 150 ng g^{-1} ;
- la zone au Nord de la rivière Beïman jusqu'à l'estuaire correspond à deux secteurs : le Maroni et l'ensemble des criques orpaillées le long du Maroni. De

nombreuses barges sont présentes sur le collecteur principal (jusqu'au saut Hermina, région d'Apatou) et 80 % des échantillons collectés dans ce secteurs ont une teneur en mercure supérieure à 150 ng g^{-1} . Les teneurs en mercure mesurées dans les échantillons collectés dans les criques débouchant dans le Maroni lui-même sont deux fois moins élevées que celles mesurées dans les échantillons collectés dans le Maroni et environ 80 % des teneurs en mercure dans les criques sont inférieures à 150 ng g^{-1} .

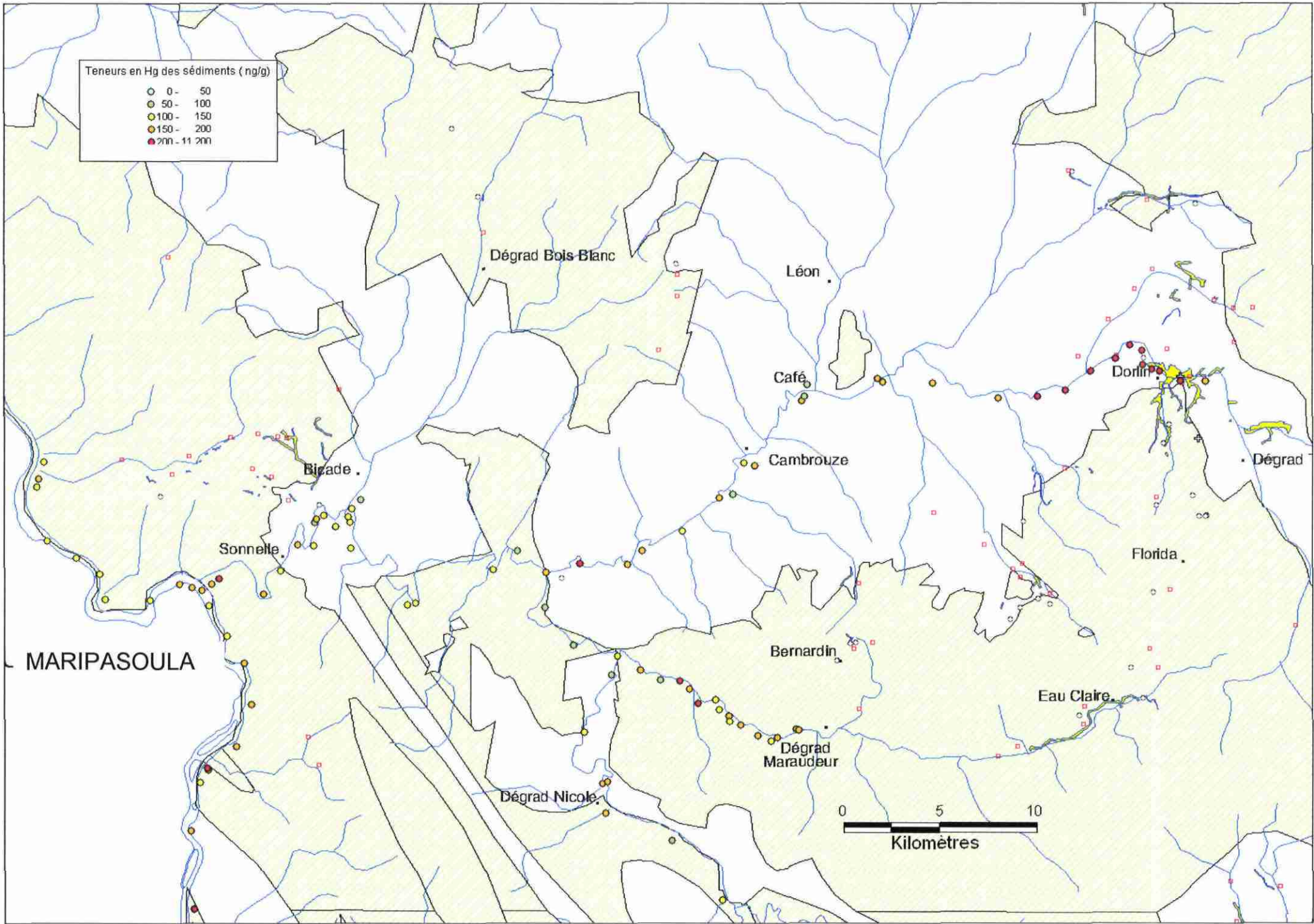


Illustration 8 : teneurs en Hg dans les sédiments < 500 µm dans la zone de Dorlin jusqu'au fleuve Maroni

3.4. PROTOCOLE DE PECHE DANS LES RIVIERES ET D'ANALYSE DES POISSONS

3.4.1. Organisation

Les techniques de pêche retenues sont adaptées à l'espèce de poisson bioindicatrice : « *Hoplias aimara* » retenue pour cette étude. Cette dernière appartient à la famille des Erythrinidae qui comprend deux espèces proches (*Hoplias aimara* et *Hoplias malabaricus*).

Le bilan des études menées dans le cadre des travaux de recherche des programmes CNRS (IVS/CNRS : 1997, programme « Mercure CNRS phase I et II, 1998 – 2007 »), ont clairement montré l'intérêt d'*Hoplias aimara* en tant que bioindicateur de la biamplification du méthylmercure le long des chaînes trophiques aquatiques (Durrieu *et al.*, 2004). En effet, cette espèce piscivore est abondante sur la quasi-totalité des cours d'eau de Guyane, facilement identifiable et représentative d'un secteur défini d'un cours d'eau, compte tenu de ses déplacements limités dans le sens amont/aval des hydrosystèmes. De plus, au cours de ces études, les différentes techniques de pêche (nivrée, ligne, filets droits, trémails, pièges...) existant en Guyane ont été expérimentées et perfectionnées, tant au niveau des matériaux retenus que de la technique de pose. Les techniques les plus adaptées pour cette espèce étant les filets maillants et les pièges.

Chaque mission a été organisée par les membres du BRGM. Un représentant du GEMA a y a été associé afin d'assurer tout l'échantillonnage des poissons. de plus, un pêcheur local expérimenté était chargé de choisir les lieux de pêche pour poser les filets et les pièges retenus dans le cadre de ce programme BRGM.

Au cours des missions BRGM, étant donné la raréfaction de l'espèce *Hoplias aimara*, liée à la présence de l'orpaillage (dégradation du milieu, turbidité excessive, sur pêche....) tous les poissons pêchés ont été échantillonnés afin de compléter le SIG par une autre espèce qui pourrait éventuellement présenter un intérêt pour cette étude.

3.4.2. Filets

La confection des filets est effectuée en France (établissement Mondiet - Gironde). Les filets ont des caractéristiques qui permettent de ne retenir que les plus gros poissons. Ces trémails flottants ont une longueur de 20 m. Ils sont réalisés en Nylon continu avec pour la nappe centrale, une maille de 35 mm et pour les nappes extérieures des aumailles de 200 mm.

3.4.3. Pièges

Les pièges sont confectionnés en Guyane (Dundee Shop – Cayenne) et spécifiques pour attraper ce type de proie. Ces pièges sont constitués par un gros hameçon auto ferrant, de 3 ou 4 cm de long, monté sur filin d'acier afin de résister aux mâchoires

puissantes d'*Hoplias aimara*. Des appâts (morceaux de poissons) sont fixés sur les hameçons. Les pièges sont mis en place avant la tombée de la nuit, accrochés à un tronc d'arbre et relevés au petit du jour en raison de la décomposition rapide des poissons liée au climat tropical ou de la prédation possible par les autres poissons.

3.4.4. Echantillonnage des muscles dorsaux des poissons

Sur place, des relevés biométriques sont effectués sur chaque poisson : longueur standard (longueur mesurée du museau à la base de la nageoire caudale) et poids total du poisson. A l'aide de matériel de dissection classique (scalpel, pince, ciseaux...) un morceau de muscle squelettique dorsal est prélevé sur le poisson dans la partie la plus charnue, le long de la nageoire dorsale. Des photos numériques sont effectuées sur chaque poisson pêché afin d'en déterminer l'espèce. La détermination des espèces est effectuée à l'aide des publications sur les poissons de Guyane (Boujard *et al.*, 1997, Keith *et al.*, 2000, Kullander et Nijssen 1989, le Bail *et al.*, 2000, Planquette *et al.*, 1996). Un codage précis des poissons est effectué. Un numéro d'identification est donné à chaque individu. Des repérages de la date, du lieu précis de capture (fleuve, affluent, coordonnées GPS liées à la position du filet ou des pièges...) sont effectués.

Compte tenu des conditions climatiques sur le terrain et des conditions d'échantillonnage, (missions itinérantes dans des zones très isolées en Guyane), la conservation des échantillons biologiques et la stabilité du niveau de concentration en mercure peut poser un problème. Au cours du programme CNRS, la stabilité des concentrations en mercure dans le muscle de poisson à partir de différents processus de conservation (congélation, produit de conservation, dessiccation...) a été testée sur 18 mois à différentes températures : 4 et 40 C, afin de trouver une solution la plus simple possible. La technique retenue, la mieux adaptée aux conditions de conservation du méthylmercure dans les échantillons biologiques, est l'utilisation d'une solution de formaldéhyde à 36 % supra pure (Prolabo, RPNormapur - sans trace de métaux lourds), diluée à 4 %. Les échantillons de muscle (5 à 10 g, poids frais/poisson) sont stockés dans des petits flacons en polyéthylène de 10 ou 30 ml de contenance.

3.4.5. Méthode d'analyse

Le mercure total est déterminé dans les matrices biologiques par spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA) sans flamme (AMA 254 – CAS France). Une aliquote d'échantillon de muscle correspondant à chaque poisson est déposée dans une nacelle, pesée puis déshydratée à 45 C pendant 48 heures. Par l'intermédiaire d'un passeur d'échantillon, les nacelles sont introduites dans l'appareil où l'échantillon est successivement séché à 120°C et décomposé à 750 C sous un flux continu d'oxygène. La totalité du mercure présent dans l'échantillon est ainsi transformée en Hg⁰ gazeux. Le flux d'oxygène véhicule ce dernier jusqu'à un piège à particules d'or, amalgamant le métal. Le piège est chauffé en quelques secondes à 800°C afin de libérer spontanément le Hg⁰. Le métal parcourt alors l'une des deux cellules de lecture correspondant chacune à une gamme de concentrations. L'appareil est étalonné en usine et un logiciel permet de choisir l'une ou l'autre des deux gammes et exprime directement le résultat en concentration.

Au cours des analyses, des échantillons biologiques certifiés sont utilisés pour valider la méthode. (TORT-2, hépatopancréas de homard; DORM-2, muscle de requin et DOLT-2, foie de requin en provenance du Conseil National de Recherches Canada - CNRC, Ottawa, Canada). Les valeurs des concentrations en mercure total sont indiquées dans le tableau 1 (TORT-2, hépatopancréas de homard ; DORM-2, muscle de requin et DOLT-2, foie de requin en provenance Conseil National de Recherches Canada - CNRC, Ottawa, Canada. Valeurs moyennes $\pm$ ET (N=5)).

La limite de détection du mercure total sur l'AMA 254 est de 0,1 ng. La précision de la méthode est donnée par l'erreur standard calculée à partir de la répétition de cinq échantillons de muscle de poisson, elle est de 5% seulement.

Les résultats des concentrations en mercure total dans les muscles de poisson seront exprimés en mg Hg/kg poids frais (Tableau 1).

		TORT-2	DORM-2	DOLT-2
Hg total (mg/kg ps)	Valeur certifiée	0,27 $\pm$ 0,06	4,64 $\pm$ 0,26	2,14 $\pm$ 0,28
	Valeur mesurée	0,27 $\pm$ 0,04	4,78 $\pm$ 0,33	2,08 $\pm$ 0,12

Tableau 1 : comparaison des concentrations certifiées et mesurées en mercure total dans les échantillons biologiques certifiés

Des tests préalables ont été réalisés pour tester l'homogénéité du mercure dans toute la masse musculaire d'un poisson. La totalité de la chair d'un poisson piscivore a été échantillonnée et dosée. Une faible variabilité des résultats, liée davantage à la technique d'analyse du mercure qu'à la variabilité intra-musculaire du poisson, a été observée : moy : 245 $\pm$ 16 μ g Hg/kg poids sec, N = 20 - CV = 6 %.

3.5. MISE EN ŒUVRE DES MISSIONS DE TERRAIN ET NOMBRE D'ECHANTILLONS PRELEVES

Les travaux de réflexion sur les aspects relatifs à la méthodologie et à la logistique ont débuté dès le mois d'avril 2005. Le matériel (flacons, tamis et filets de pêche) a été réceptionné en Guyane courant septembre 2005. Une première mission test a été organisée sur l'aval du bassin versant de la Comté le 21/09/2005 puis sur le reste du bassin Comté - Orapu du 27/09/2005 au 02/10/2005.

Ce test a permis de valider le matériel, le protocole d'échantillonnage, d'appréhender les difficultés à venir, et de préparer l'équipe de projet à la consultation des prestataires aptes à répondre aux besoins spécifiques des missions.

3.5.1. Moyens humains et matériels mis en œuvre

Globalement, tous les prestataires (Tableau 2) ont rempli leurs obligations, même si les prestations fournies ont été de qualité très inégale et s'il a fallu parfois user d'autorité pour conserver la maîtrise de l'échantillonnage propre à ce projet.

Secteur	Durée (jours)	Prestataire retenu
Oya 1	3	Léal Vadius (S ^t Georges)
Oya 2	5	Léal Vadius (S ^t Georges)
Com1	7	Quimbé Kio (Cacao)
Mar1	4	Maroni Transport (S ^t Laurent)
App1	9	Transport Amazonie (Régina)
Mar2	11	Pom'Cajou (Grand Santi)
Mar3	11	Pom'Cajou (Maripasoula)
Oya3	10	René transport (Camopi)
Mar4	10	Association Yépé (Antécumkata)
Man2	5	Pernot (Placer de S ^t Léon)
App2	12	Transport Amazonie (Régina)
Man1	12	Grands placers (Cayenne)

Tableau 2 : liste des prestataires retenus pour chaque secteur

Les prestataires ont mis à disposition des pirogues (bois ou alu) dont les longueurs sont comprises entre 7 et 12 m avec une motorisation allant de 15 cv (Maroni) à 65 cv. Une pirogue complémentaire a été fournie sur les missions App1 et 2 ; Mar2 et 3 et Man1 (Illustration 9).

Malgré un cahier des charges bien précis, seuls certains prestataires se sont équipés de moteurs de secours et de tronçonneuses. A défaut de ces équipements, certaines missions (Mar3, Mar2 et Oya2) ont pris du retard ou ont été limitées.

L'organisation du campement, du ravitaillement (sauf Mar4) étaient à la charge des prestataires.

En moyens humains, les prestataires devaient fournir un ou deux motoristes, du personnel connaissant particulièrement la région et un spécialiste de la pêche. Les équipes ont varié de deux à quatre personnes.



Illustration 9 : matériel mis en œuvre sur App1 et sur Mar2

Le matériel de prélèvement embarqué sur chaque pirogue consistait en :

- 2 tamis de 500 μ m avec leur réceptacle et 1 tamis à mailles centimétriques pour séparer feuilles et résidus grossiers ;
- spatules en caoutchouc pour presser la vase ;
- des flacons en PVC de 250 ml et de 500 ml avec obturateur et cape à vis ;
- casiers plastiques et touques étanches pour le conditionnement des échantillons ;
- une tarière de type « Vrijwit » permettant un prélèvement de vase sous une tranche d'eau importante (1 à 2 m),
- sacs plastiques de 18 X 25 cm et agrafeuse ;
- planche de contre plaqué plastifiée et tréteaux (pour tamisage des échantillons).
- Le matériel de pêche et d'échantillonnage des poissons était préparé par le GEMA et le BRGM soit au minimum pour chaque mission :
- quatre trémails de 20 m de long et 1,6 m de hauteur en maille de 35 mm et aumailles de 150 mm ;
- quatre trémails de 15 m de long et 1,60 m de hauteur en maille de 35 mm et aumailles de 150 mm ;
- une vingtaine d'hameçons montés sur câble pour aymaras ;
- une grosse touque de matériel de prélèvement et conditionnement des échantillons ;
- une glacière de 120 litres pour la conservation du poisson pêché.

Pour la localisation et la sécurité de la mission, chaque équipe a été dotée de la carte prévisionnelle des prélèvements envisagés, des cartes au 1/50 000^{ème} du secteur concerné, de deux GPS « Magellan », d'un appareil photo numérique, d'un téléphone satellite et d'une trousse de secours « chantier ».

La mission test, effectuée sur la Comté en septembre 2005, a démontré qu'il fallait concilier la nécessité d'avancement et de pénétration des criques et celle d'accéder au niveau des sédiments en particulier dans les grands collecteurs.

Les sédiments déposés lors des crues ou au niveau haut des criques sont lessivés facilement par les pluies et sont inexistantes. Il a donc fallu se trouver à un niveau bas de l'eau pour espérer trouver les meilleurs sites de sédiments.

Si les périodes les plus propices ont été les transitions entre période sèche et début des pluies, il a fallu s'adapter à chaque cas. Ainsi sur Mar2 et Mar3 une crue soudaine du fleuve Maroni a retardé la mission de trois semaines.

Pour tenir le calendrier prévu, il a fallu mener plusieurs missions conjointement pour profiter des périodes favorables sur le plan météorologique.

3.5.2. Dates et éléments des missions de terrain

Les douze secteurs envisagés (Illustration 2) dans le programme initial ont été couverts de septembre à décembre 2005, puis de février à mars 2006 et enfin d'août à novembre 2006, par des équipes composées notamment du personnel BRGM de Guyane, du personnel du GEMA de Bordeaux et des piroguiers, sous-traitant locaux qui ont aidé aux prélèvements. Le GEMA a participé à toutes les missions de prélèvement sur le terrain, excepté pour deux d'entre elles, Oyapock 3 et Maroni 4 au cours desquelles les poissons ont cependant été pêchés, échantillonnés puis envoyés par l'équipe BRGM, au GEMA qui les a traités.

Le nombre d'échantillons prélevés au cours de ces missions, tant pour les sédiments que pour les poissons est présenté dans les tableaux 3 à 7 ci-après.

Secteur	Date des missions	Missions	Numéro des échantillons de sédiments	Nombre d'éch. de sédiments	Nombre d'éch. par fleuve
Approuague 1	du 06/12 au 15/12/2005	APP1	310 à 475	166	255
Approuague 2	du 17/10 au 28/10/2006	APP2	1060 à 1148	89	
Comté 1	du 26/09 au 01/10/2005	COM1	1 à 105	105	105
Mana 1	du 15/11 au 26/11/2006	MAN1	1150 à 1318	169	212
Mana 2	du 05/09 au 10/09/2006	MAN2	1010 à 1052	43	
Maroni 1	du 14/11 au 18/11/2005	MAR1	110 à 163	54	385
Maroni 2	du 07/03 au 19/03/2006	MAR2	480 à 613	134	
Maroni 3	du 07/03 au 19/03/2006	MAR3	650 à 766	117	
Maroni 4	du 19/09 au 01/10/2006	MAR4	930 à 1009	80	
Oyapock 1	du 28/11 au 02/12/2005	OYA1	250 à 304	55	254
Oyapock 2	du 21/11 au 26/11/2005	OYA2	180 à 245	66	
Oyapock 3	du 29/08 au 07/09/2006	OYA3	780 à 912	133	
Total				1211	1211

Tableau 3 : dates des missions et nombre d'échantillons de sédiments prélevés

Au cours des douze missions réalisées, 1211 échantillons de sédiments fins vaseux ont été prélevés et 974 poissons ont été pêchés qui représentent 52 espèces différentes.

Zones	Date des missions	Missions	Nombre de poissons par mission	Nombre de poisson par fleuve	Nombre d'espèces prélevé par fleuve	fleuve
Approuague 1	Du 06/12/2005 au 15/12/2005	APP1	136	230	26	Approuague
Approuague 2	Du 17/10/2006 au 28/10/2006	APP2	94			
Comté 1	Du 26/09/2005 au 01/10/2005	COM1	25	25	8	Comté
Mana 1	Du 15/11/2006 au 26/11/2006	MAN1	188	265	25	Mana
Mana 2	Du 05/09/2006 au 10/09/2006	MAN2	77			
Maroni 1	Du 14/11/2005 au 18/11/2005	MAR1	42	349	34	Maroni
Maroni 2	Du 07/03/2006 au 19/03/2006	MAR2	135			
Maroni 3	Du 07/03/2006 au 19/03/2006	MAR3	103			
Maroni 4	Du 19/09/2006 au 01/10/2006	MAR4	69			
Oyapock 1	Du 28/11/2005 au 02/12/2005	OYA1	36	105	23	Oyapok
Oyapock 2	Du 21/11/2005 au 26/11/2005	OYA2	20			
Oyapock 3	Du 29/08/2006 au 07/09/2006	OYA3	49			
Total			974	974	52	

Tableau 4 : nombre de poissons et d'espèces pêchés par missions et par fleuve

Le nombre de poisson prélevé par fleuve est corrélé au nombre de missions effectuées et à la longueur du fleuve.

Le tableau 5 représente la répartition des poissons au niveau des principaux fleuves en fonction de leur régime alimentaire. L'échantillonnage est représentatif des processus de bioamplification du mercure au sein de la chaîne trophique car 51 % des poissons pêchés sont des piscivores. Les autres poissons sont répartis dans les autres régimes alimentaires : carnivores, herbivores, périphtophages, omnivores et détritivores.

fleuve	carnivores	détritivores	herbivores	omnivores	périphtophages	piscivores	Total par fleuve
Maroni	34	15	30	62	9	199	349
Mana	21	7	46	67	1	123	265
Comté	5	6	6	0	0	8	25
Approuague	26	9	67	17	0	111	230
Oyapok	14	3	16	17	1	54	105
Total par régime alimentaire	100	40	165	163	11	495	974

Tableau 5 : nombre de poissons collectés par régime alimentaire et par fleuve

Le tableau 6 représente toutes les espèces de poissons prélevées au cours du programme BRGM classées en fonction du régime alimentaire et de leur classification. Selon l'espèce collectée le nombre de poissons est très variable et 30 espèces sur 56 collectées ont un effectif supérieur à 5 poissons.

régime	ordre	famille	nom latin	N
carnivores	Perciformes	Sciaenidae	<i>Pachypops fourcrol</i>	1
	Elopiiformes	Megalopidae	<i>Tarpon atlanticus</i>	3
	Siluriformes	Artidae	<i>Arius couma</i>	6
	Gymnotiformes	Rhampichthyidae	<i>Rhampichthys rostratus</i>	8
	Rajiformes	Dasytidae	<i>Potamotrygon hystrix</i>	24
	Perciformes	Sciaenidae	<i>Plagioscion squamosissimus</i>	27
	Characiformes	Serrasalminidae	<i>Serrasalmus humeralis</i>	28
détritviores	Siluriformes	Auchenipteridae	<i>Pseudauchenipterus nodosus</i>	3
			<i>Cyphocharax</i>	1
	Characiformes	Curimatidae	<i>Semaprochilodus varii</i>	8
			<i>Curimata cyprinoides</i>	13
			<i>Prochilodus reticulata</i>	14
herbivores			lotte	1
			<i>Acnodon oligacanthus</i>	1
	Characiformes	Serrasalminidae	<i>Myleus rhomboidalis</i>	50
			<i>Myleus ternetzi</i>	54
			<i>Myleus rubripinnis</i>	60
périphytophages	Siluriformes	Loricariidae	<i>Hypostomus cf. ventromaculatus</i>	1
			<i>Pseudoancistrus barbatus</i>	10
omnivores			<i>Leporinus fasciatus</i>	1
		Anostomidae	<i>Leporinus melanostictus</i>	2
			<i>Leporinus maculatus</i>	5
			<i>Leporinus friderici</i>	52
	Characiformes	Characidae	<i>Triportheus rotundatus</i>	5
			<i>Brycon falcatus</i>	9
			<i>Hemiodopsis quadrimaculatus</i>	1
		Hemiodidae	<i>Hemiodus unimaculatus</i>	4
			<i>Hemiodopsis huraulti</i>	15
	Gymnotiformes	Sternopygidae	<i>Sternopygus macrurus</i>	1
	Perciformes	Cichlidae	<i>Geophagus surinamensis</i>	1
			<i>Geophagus camopiensis</i>	2
			<i>Geophagus harreri</i>	8
		Auchenipteridae	<i>Parauchenipterus galeatus</i>	9
	Siluriformes	Doradidae	<i>Doras carinatus</i>	9
			<i>Platydoras costatus</i>	39
piscivores			<i>Acestrorhynchus guianensis</i>	1
			<i>Galeocharax aff. Gulo</i>	1
		Characidae	<i>Charax pauciradiatus</i>	3
			<i>Cynopotamus essequibensis</i>	14
	Characiformes		<i>Cynodon melonactis</i>	15
		Ctenopomidae	<i>Boulengerella lucia</i>	7
		Erythrinidae	<i>Hoplias malabaricus</i>	13
			<i>Hoplias aimara</i>	228
		Serrasalminidae	<i>Serrasalmus rhombeus</i>	61
	Perciformes	Cichlidae	<i>Cichla ocellaris</i>	2
		Ageneiosidae	<i>Ageneiosus brevifilis</i>	119
			<i>Brachyplatystoma filamentosum</i>	1
			<i>Brachyplatystoma flavicans</i>	1
	Siluriformes	Pimelodidae	<i>Pimodella magalops</i>	1
			<i>Pimelodus ornatus</i>	3
			<i>Hemisorubim platyrhynchos</i>	5
			<i>Pseudoplatystoma fasciatum</i>	20

Tableau 6 : tableau récapitulatif des espèces de poissons collectées au cours du programme BRGM

Le tableau 7 représente l'ensemble des poissons de la famille des Erythrinidae collectés au cours des programmes CNRS et BRGM. Les deux programmes sont complémentaires car les zones exploitées sont différentes d'un programme à l'autre et ont permis ainsi d'échantillonner des Hoplias sur l'ensemble du territoire de la Guyane.

	Maroni	Mana	Sinna-mary	Comté	Approuague	Oyapock	total
CNRS	118	20	178	83	17	64	480
BRGM	112	57		5	46	21	241
total	230	77	178	88	63	85	721

Tableau 7 : tableau récapitulatif des Erythrinidae collectés au cours des programmes CNRS et BRGM

3.5.3. Données complémentaires sur les différents secteurs pour les prélèvements de sédiments

Oya 1

Il s'agit de la partie aval du fleuve Oyapock. La partie amont du saut Maripa ayant été exploitée par des dragues le pas d'échantillonnage a été resserré. Il en est de même dans la crique Gabaret, où s'effectue la prise d'eau potable pour la commune de Saint-Georges.

L'effet de la marée jusqu'au Saut Maripa influe sur la nature des sédiments. Un pas de 5 km avant Saint-Georges et 10 km jusqu'à l'embouchure a semblé suffisant.

La crique Ouanary draine des secteurs orpaillés, elle a été traitée suivant les critères généraux visés au chapitre précédent.

Oya 2

Il s'agit de la partie moyenne du fleuve Oyapock. La partie amont et aval du saut Fourmi ayant été exploitée par des dragues le pas d'échantillonnage a été resserré.

Le pas de 5 km a été choisi sur la plus grande partie du fleuve.

Quelques échantillons ont été placés sur la confluence et le cours des principales criques afin de les caractériser.

La crique Sikini a été particulièrement couverte car elle a fait l'objet d'un orpaillage intense dans les dix dernières années.

Oya 3

Il s'agit de la partie sud du fleuve Oyapock et de la rivière Camopi. Cette dernière draine des secteurs orpaillés, elle a été traitée suivant les critères généraux visés au chapitre précédent.

L'échantillonnage en amont et en aval des villages de Trois sauts, Pina et Zidock a été fait tous les kilomètres, sur une distance d'au moins 25 km. Si un prélèvement régulier tous les 5 km a été choisi pour la plus grande partie du fleuve, un resserrement systématique à 1 km a été utilisé au droit des formations Paramaca et des principales confluences.

Au niveau du village de Camopi un resserrement de la grille a également été choisi.

App 1

Il s'agit de la partie aval du fleuve Approuague. Cette zone a été particulièrement touchée par l'exploitation de l'or. Tous les collecteurs ont été échantillonnés plus ou moins en amont suivant leur accessibilité. Il est à noter que l'effet de la marée se fait sentir jusqu'au saut Mapaou (amont de la crique Tortue).

App 2

Seules les têtes de l'Approuague et de son principal affluent la Sapokaye ont été exploitées. Les accès étant difficiles, l'accent a été mis sur l'évaluation de la diffusion du mercure dans les drains majeurs en prélevant de façon systématique tous les un kilomètre toutes les confluences en amont et en aval aussi haut que possible sans que l'on puisse atteindre probablement les centres d'orpaillage

Com1

La zone concerne principalement le bassin de la Comté, l'Orapu et l'Oyak. Les zones aurifères concernent aussi bien les têtes de la Comté et de l'Orapu, que leur cours moyen (zone de Cacao et Coralie) et, dans une moindre mesure, sur le cours aval (Counana). Les enjeux étant forts (zones de Cacao, de Roura et la prise d'eau de l'île de Cayenne), un échantillonnage serré a donc été utilisé sur les zones exploitées, en amont et en aval, sur les confluences et au droit des zones habitées et des zones sensibles.

Man 1

Il s'agit de la partie aval du fleuve Mana. Ses affluents, la crique Arouani et la crique Léopard, drainent un des plus importants sites miniers de la Guyane (Paul Isnard Délices). Les échantillons ont été prélevés tous les kilomètres sur la partie accessible de ces rivières ainsi qu'aux affluents qui s'y jettent.

Un prélèvement tous les 5 km a été utilisé pour le cours aval de la Mana jusqu'à Saut Sabbat où l'effet de la marée est encore perceptible.

Il est à noter que les prélèvements face à la commune de Mana ont été effectués indépendamment de cette mission pour des raisons logistiques.

Man 2

La majeure partie du cours de la Mana, draine une zone granitique exempte de toute activité d'orpaillage. L'échantillonnage a donc été plus concentré en amont dans un secteur difficilement accessible, compte tenu des nombreux sauts à passer.

Mar 1

Les berges de la partie aval du Maroni sont fortement peuplées. L'accent a donc été mis sur un échantillonnage en amont et en aval des diverses communes et de leurs écarts.

L'orpaillage y étant actif, la Sparouine et la crique Serpent ont été échantillonnées dans la mesure de leur accessibilité.

La grille de prélèvement a été resserrée en aval et en amont de St Jean, pour tenir compte du projet du futur captage d'eau de St Laurent.

A noter cependant que la marée est active jusqu'au saut Hermina en aval d'Apatou.

Mar 2

Les remarques précédentes s'appliquent à cette zone. Les grands affluents, crique Beïman et crique Grand et Petit Abounami, ont été échantillonnés dans la mesure de leur accessibilité.

Mar 3

Cette zone a la particularité d'être fortement peuplée (2 communes + écarts) et connaît une forte activité minière (Grand et Petit Inini, crique Eau claire). Une maille d'un kilomètre a donc été utilisée au droit des lieux habités et en aval des placers.

Mar 4

L'échantillonnage sur le fleuve Litany en amont et en aval des villages amérindiens a été fait tous les kilomètres sur une distance d'au moins 25 km. Si un prélèvement régulier tous les 5 km a été choisi pour la partie restante du fleuve et le Tampok, un resserrement systématique à un kilomètre a été utilisé au droit des placers sur la crique Ouaiqui.

3.5.4. Les trajets et l'avancement des campagnes d'échantillonnage

Les trajets

Environ 2 180 km de criques et fleuves principaux ont été parcourus sur l'ensemble des douze missions. A ce chiffre doit être rajouté les distances de pénétration (à pied ou en canot) des petites criques difficilement évaluables.

Avec les mises en place incontournables sur les missions en amont des fleuves, les déplacements totaux en canots ont représenté 5 452 km.

Les difficultés d'avancement

Il n'a pas été possible de naviguer plus de 80 km par jour de travail de prélèvement. Certains jours la progression n'a été que de dix à quinze kilomètres.

Les facteurs limitants ont été :

Les contournements ou le passage des sauts (Illustration 10 a et b), l'encombrement des criques (Illustration 11a) et le niveau bas des eaux (Illustration 11b).

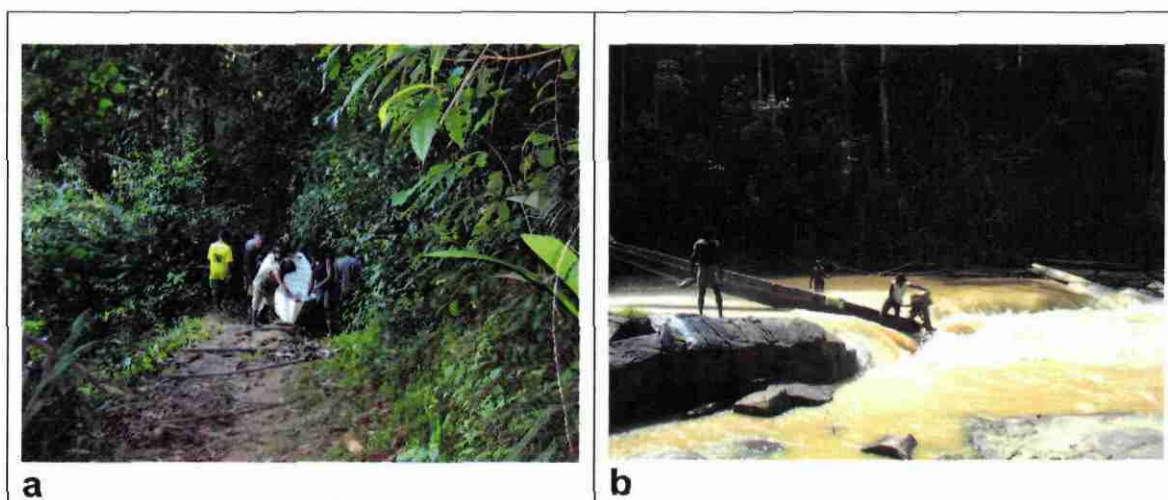


Illustration 10 : (a) contournement des sauts (App2, St Canori) et (b) le passage des sauts (Mar2, crique Petit Abounamy)

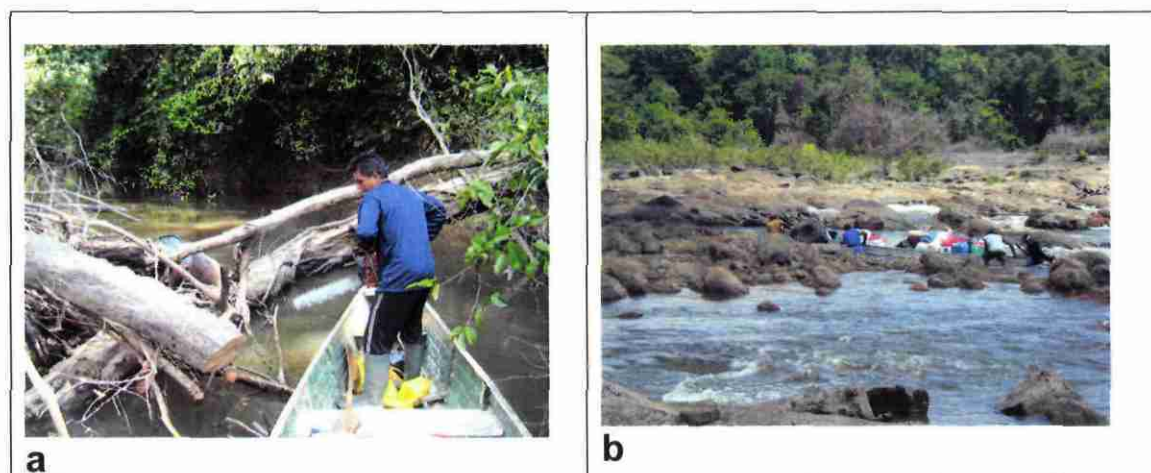


Illustration 11 : (a) encombrement des criques (Man2, crique Sophie) et (b) le niveau bas des eaux (Oya)

Il n'a pas été possible d'accéder en amont des zones orpaillées, celles-ci se trouvant dans la plupart des cas en tête des petites criques non accessibles en canot. Quand, le passage était possible, la navigation a parfois été freinée par la turbidité importante des eaux (Illustration 12a) ou stoppée par des obstacles placés par les clandestins (Illustration 12b).



Illustration 12 : (a) turbidité de l'eau (App2, crique Couata) et (b) les obstacles échaffaudés par les clandestins (Mar3, crique Petit Inini)

Les incidents de parcours

• La navigation

Sur près de 6 000 km de navigation et le passage d'une centaine de sauts, seule la mission Mar2 a connu un chavirage sur la crique Beïman. Une vingtaine d'échantillons ont été perdus mais intégralement re-prélevés. Le matériel de prélèvement a pu être récupéré.

Les missions Mar2, Mar3, Com1 ont connu des pannes et casses de moteurs.

• L'orpaillage clandestin

Les rencontres avec les clandestins lors des missions ont été dans l'ensemble sans problèmes et, dans la mesure du possible, les contacts avec les opérateurs clandestins ont été évités.

• La pêche

A l'exception des journées consacrées à la mise en place des missions, les filets et (ou) hameçons ont été placés à chaque bivouac. 110 sites différents de pêche ont été répertoriés dont 73 dans des eaux troubles à turbides, voire très turbides.

L'arrivée au bivouac vers 16 h ou 17 h a permis à l'équipage de poser les filets dans des endroits propices (Illustration 13). Le métier et l'expérience des piroguiers ont été essentiels pour le résultat de la pêche. Cependant, cette prestation n'a pas été d'égale qualité durant toutes les missions.

Il a fallu disposer de 8 à 11 filets et d'une vingtaine de trappes pour que la pêche soit satisfaisante et qu'il soit attrapé au moins un aymara par jour.

Le temps de pose et de récupération des filets a été important pouvant atteindre 4 voir 5 heures par jour. La réussite de la pêche a donc fortement été dépendante de la disponibilité de l'équipage qui devait, par ailleurs, assurer la navigation, les repas et le bivouac soit huit heures en moyenne.

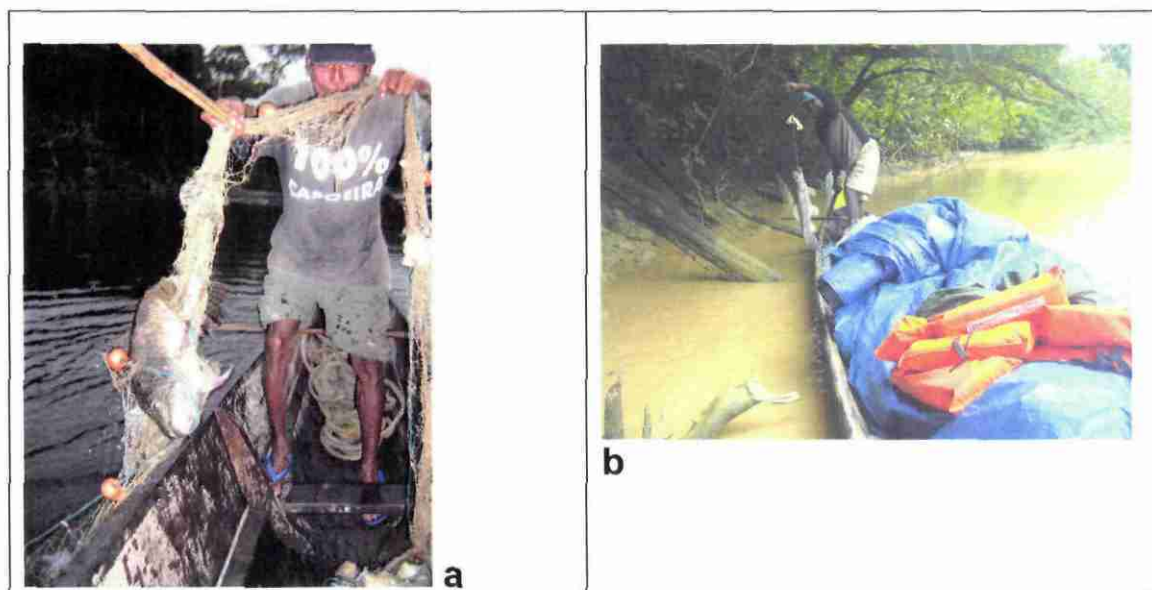


Illustration 13 : (a) aymara pris au filet (Oya3) et (b) Aymara pris à la trappe (Mar1)

L'identification des poissons (Illustration 14a) a demandé un temps non négligeable (une à deux heures par filet). Cette durée a nettement augmenté du fait de la collecte systématique de toutes les espèces capturées.

Il n'a pas fallu non plus négliger le temps pour nettoyer les filets (Illustration 14b) qui a augmenté avec leur nombre (11 au lieu de 4).

La disponibilité d'une seconde pirogue a permis toutefois de libérer une équipe pour aller prélever les sédiments sans attendre la collecte des poissons.



Illustration 14 : (a) identification des poissons (Oya2) et (b) nettoyage des filets (App2)

3.5.5. La collecte des sédiments

Quelques chiffres

Sur 1 303 échantillons prévus, 1 211 ont été prélevés. 415 échantillons ont été prélevés sur les 11 grands collecteurs identifiés, 329 sur 22 petits collecteurs (dont 8 orpaillés), 225 sur 171 criques orpaillées ou l'ayant été et 242 sur 197 criques non orpaillées. 387 échantillons ont été prélevés dans des eaux très troubles, turbides soit environ 1/4 de la collecte totale.

Méthodologie de la recherche de sédiments

La recherche des sédiments, en règle générale, ne s'est pas passée facilement. Les recherches des affleurements vaseux selon une démarche sélective classique (courant faible, méandres intérieurs, plantes moucous-moucous) s'est avérée inefficace dans une bonne partie des cas.

La priorité a été donnée à la recherche, en respectant le mieux possible, la maille de prélèvement prévue et le type de vase qui semblait le plus correspondre à une boue fine, glissant entre les doigts caractérisant un dépôt de sédiments dans une zone calme, généralement plate (mais pas toujours) et à l'abri d'un obstacle naturel (mais pas toujours).

Selon les cas, les pièges à vase se sont donc avérés très différents : grands flats à l'extérieur des méandres, « plage » à l'abri d'un tronc ou roche (chenal régulier), sous une mince couche de sable (criques sableuses ; variabilité du niveau importante), dans la végétation riveraine ou dans des herbes basses (sauts), etc (Illustration 15).



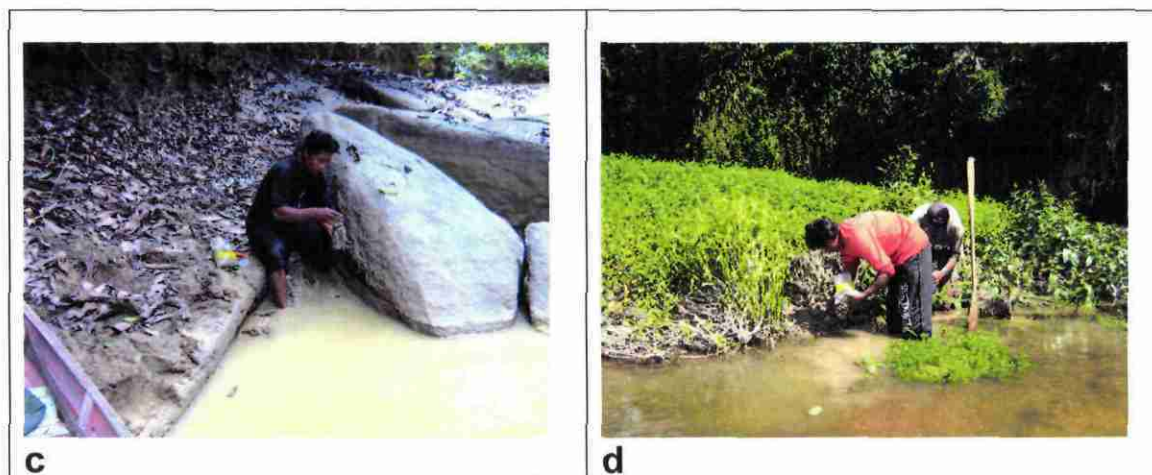


Illustration 15 : (a) amas de feuilles et vase : Ech N° 1069 (App2), (b) Plage de vase à l'abri de troncs : Ech N° 1096 (App2), (c) Vase à l'abri d'une roche : Ech N° 1125 (App2) et (d) Vase dans végétation d'herbes basses : Ech N° 968 (Mar4)

Les criques sableuses (Comté, Oyapock ...), les sauts et les criques turbulentes ont été des milieux très pauvres en sédiments. Tout sédiment qui, au toucher, laissait supposer une part importante de sable n'a pas été prélevé. Certains dépôts de sédiments, inaccessibles à marée haute ont été prélevés à la tarière de type « Vrijwit ».

Méthodologie de la collecte des sédiments

A chaque site de vase ainsi validé, un échantillon intact était conditionné dans un flacon de 500 ml, un autre échantillon était tamisé à 500 μ m puis conditionné dans un flacon de 250 ml. Dans le même temps, ont été notés : les observations caractérisant le site, la nature du sédiment, la localisation sur la carte et des coordonnées GPS du lieu de prélèvement.

Dans certains cas, et afin de pouvoir disposer d'assez de temps pour la navigation et diriger la mission, le traitement des échantillons a été différé jusqu'à l'arrivée au bivouac, en stockant provisoirement la quantité nécessaire de sédiment dans un sac plastique. Le tamisage s'est fait sans apport d'eau en pressant le sédiment à l'aide d'une palette en plastique.

Chaque prélèvement a été numéroté de 0 001 à 1 318 et de façon unique afin qu'il n'y ait aucune répétition quelle que soit la zone couverte. Chaque flacon portait en sus le nom de la zone prospectée.

La participation du GEMA à la collecte des sédiments et au tamisage a fortement contribué à augmenter le nombre d'échantillons collectés par jour. Le traitement des échantillons à l'arrivée au bivouac a permis de libérer un temps non négligeable pour prendre des notes et assurer une navigation correcte.

Typologie des sédiments

Sur les 1211 échantillons collectés, cinq grandes classes de sédiments ressortent selon leur couleur, leur origine, leur composition ou leur état.

• Les sédiments organiques :

De couleur noirâtre ou brunâtre, ils présentent des débris de feuilles et végétaux plus ou moins fins. Ils sont souvent odorants. Ils peuvent être limoneux ou quelquefois sableux (Illustration 16).

On les trouve plus fréquemment dans les petites criques, sous des dépôts de feuilles, sur des berges plus ou moins inclinées. Mais ils peuvent être également présents dans des vastes flats ou bras mort des grands collecteurs. Ce type de sédiment se rencontre également sur des criques importantes, claires, à faible courant.



Illustration 16 : (a) échantillon APP1098 et (b) MAR983.

• Les sédiments liés à l'orpaillage

De couleur jaune, ocre ou verte, ces sédiments proviennent d'une activité anthropique essentiellement de l'orpaillage clandestin ou régulier (Illustration 17).

Ils sont argileux, très fins et homogènes, généralement en couche épaisse, quelquefois en alternance avec du sable.

Rarement dans les grands collecteurs, ils sont toujours présents dans les zones d'activité d'orpaillage intense (récente ou historique) et plus discrets et même inexistants lors d'activité plus faible.

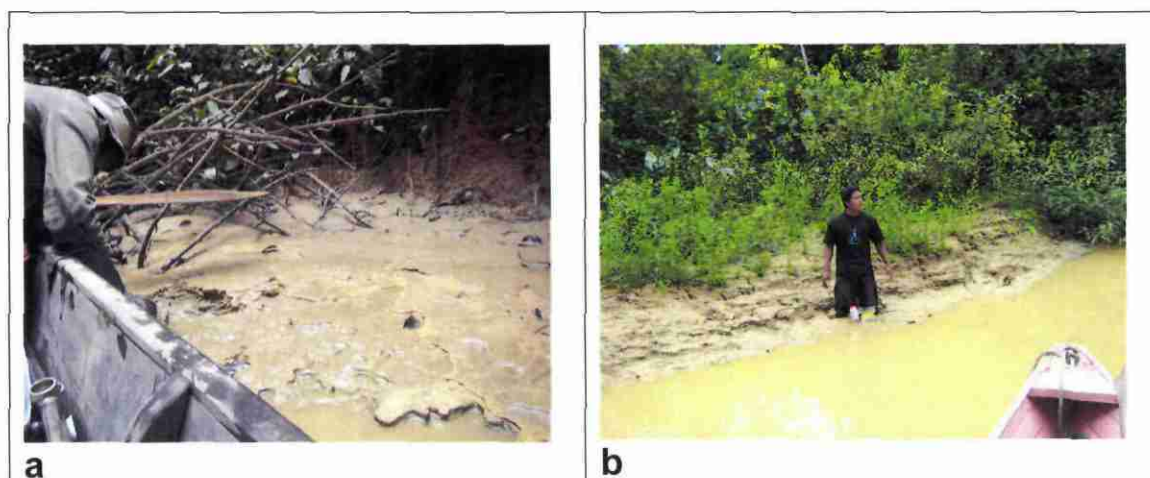


Illustration 17 : (a) échantillon MAR692 sur la crique Petit Inini et (b) échantillon APP1124 sur la crique Couata.

• Les sédiments - vases

Il s'agit des sédiments classiques à toute rivière. Ils sont bruns, marrons à gris (Illustration 18).

Il s'agit d'une « boue » à particules très fines, glissante entre les doigts, homogène, quelquefois limoneuse, rarement sableuse. Ils peuvent former des bancs épais ou des couches fines.

Ils forment soit des plages de vases, soit des légères couches retenues par la végétation et les herbes, soit des poches entre les racines d'arbres ou derrière un obstacle. Ils constituent les vases (d'origine fluviale ou marine) en aval des grands fleuves dans la zone d'influence des marées.

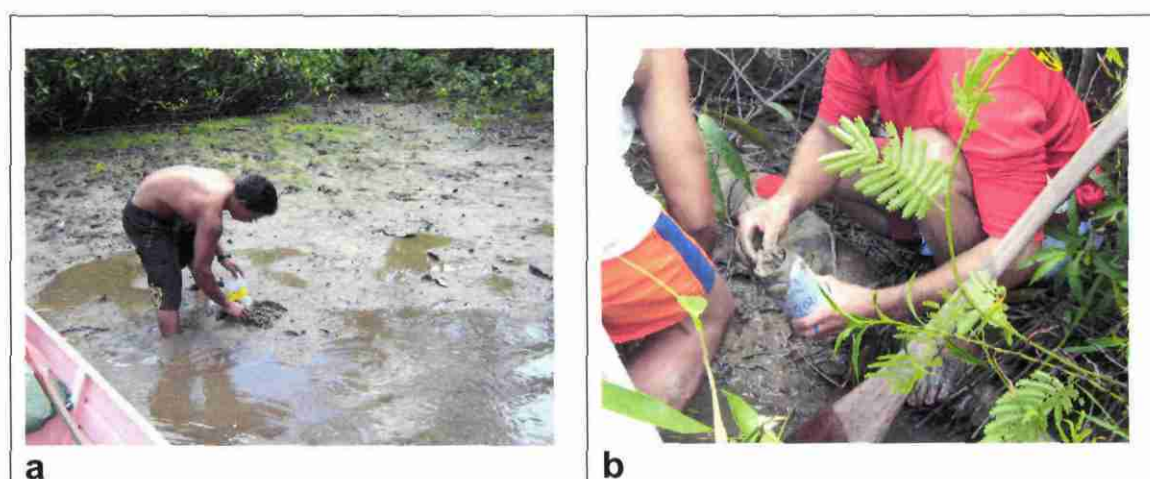


Illustration 18 : (a) échantillon APP1080 et (b) échantillon OYA802

• Les sédiments hétérogènes

Ce sont les sédiments que l'on va trouver dans les zones où le prélèvement est difficile (criques sableuses, amont des fleuves, courant fort, etc).

Ils sont marron clair le plus souvent, quelquefois marron à brun (Illustration 19).

Jamais en couche épaisse, ils se déposent en strates ou en couche fine sous ou sur des couches de sable, d'argile, et de feuilles. Souvent limoneux et sableux, ils peuvent présenter un aspect terreux, argileux et comporter des fins débris végétaux.

Ce sont les sédiments des grandes lignes droites des fleuves, au pied des berges d'un à deux mètres, sur des petites terrasses étroites. Ils se rencontrent également dans les petites criques.



Illustration 19 : (a) échantillon MAN537 et (b) échantillon APP1103

• Les crèmes de vase :

La crème de vase n'est pas une classe de sédiments à proprement parler, mais un état de la vase.

Légère, peu consistante, telle une mousse ou une crème sans être tout à fait être liquide, elle constituait, lors de la première mission, le principal type de sédiment à prélever. Mais il s'est avéré très rapidement qu'il serait difficile de respecter cet objectif.

Elle est toujours récente : c'est par exemple le dernier apport de vase d'une marée. C'est également la partie supérieure d'une couche de vase pas encore sédimentée. Elle peut donc être organique, vasarde, argileuse quelquefois limoneuse. Elle est, nécessairement, soit au niveau de l'eau, soit sous l'eau (Illustration 20).



Illustration 20 : (a) échantillon COM10 sur le fleuve Oyac et (b) échantillon MAN1174 sur la crique Cokioco

3.5.6. Difficultés relatives aux missions de terrain, solutions appliquées et conséquences

Les difficultés ont porté sur divers aspects :

- recherche des prestataires piroguiers : peu nombreux, spécifiques pour chaque bassin, pas forcément disponibles en période favorable pour l'échantillonnage des cours d'eau (hors saison des pluies) → *d'où multiplication des négociations et augmentation des temps consacrés à la préparation des missions ;*
- aléas des conditions climatiques :
 - soit basses eaux rencontrées au cours de certaines missions au lieu des moyennes eaux espérées → *d'où augmentation des temps passés (sauts, branches, troncs, ...) et mise en place de deux missions en parallèle ;*
 - soit hautes eaux à certaines dates envisagées dans le planning initial qui, de ce fait, ont été retardées pour ne pas pénaliser l'échantillonnage des sédiments ;
- échantillonnage des sédiments : recherche « tâtonnante » des sites adéquats pour les « pièges à vases », ajustement à chaque point initialement prévu, plusieurs prises sur des lieux différents → *d'où augmentation des temps passés, réduction du temps disponible pour la pêche ;*
- échantillonnage des poissons : raréfaction des Aymaras du fait d'une sur-pêche et de la dégradation du biotope lié à l'orpaillage → *d'où mise en place d'une 2^{ème} pirogue au cours des missions, multiplication des moyens de pêche (matériel et temps), exploitation de toutes les espèces prélevées.*

Toutes les contraintes précisées précédemment ont généré une augmentation des temps passés à la préparation et à la réalisation des missions et par voie de conséquence, un accroissement des dépenses non initialement prévues.

Il faut souligner que le nombre d'échantillons prélevés et analysés, tant pour les sédiments que pour les poissons, dépasse ce qui avait été initialement envisagé. En effet, la logistique pour réaliser les missions de terrain s'étant avérée lourde et difficile à mettre en œuvre la prise d'échantillons a été assurée au-delà du cahier des charges, afin de fournir le maximum de données pour la communauté scientifique.

3.6. MISE EN PLACE DES BASES DE DONNEES INFORMATIQUES ET DU SIG

Les lieux de prises des sédiments et des poissons sont repérés selon le même système de coordonnées WGS 84, fuseau Nord 22 que les sites d'orpaillage.

3.6.1. Pour les sites d'orpaillage

Les fichiers des zones orpaillées connues, récupérés au BRGM, à la DRIRE (exploitations officielles), à l'ONF (sites clandestins / flats orpaillés) et à la Gendarmerie (sites clandestins / opérations Anaconda) ont été homogénéisés dans des fichiers sous format Excel (non présentés dans ce rapport) et pourront, en fin de projet, être visualisées sous forme de carte comme présenté sur l'illustration 1.

3.6.2. Pour les sédiments

Le fichier de base, au format Excel, contient le numéro d'identification (unique) de l'échantillon, la date du prélèvement, le nom de la mission au cours de laquelle il a été prélevé, le cours d'eau concerné et les coordonnées (X, Y), la commune, la nature géologique des roches, des observations de terrain sur le lieu des prélèvements, une information sur la connaissance d'une exploitation aurifère en amont, des observations visuelles sommaires de laboratoire et les résultats des concentrations en mercure total (en ng g^{-1}).

3.6.3. Pour les poissons

Le fichier au format Excel contiendra : un numéro d'inventaire unique pour chaque individu pêché, la date de prélèvement, la mission au cours de laquelle il a été prélevé, la crique ou l'affluent concerné, la toponymie du lieu de pêche, les coordonnées GPS (X, Y) du point de pêche transformées ensuite selon le système WGS 84 fuseau Nord 22, l'Ordre et la famille du poisson concerné, son nom local, le nom latin, la longueur (cm) et le poids frais (g) de l'individu pêché, les concentrations en HgT ($\mu\text{g g}^{-1}$) par rapport au poids frais et par rapport au poids sec, ainsi que le régime alimentaire.

Pour l'interprétation sur les Aymaras, seront pris en compte les poissons pêchés dans le cadre du programme Mercure Guyane (CNRS – Axe I, II et IV) du fait de la complémentarité des deux études.

4. Conclusions du rapport d'avancement

Ce projet, amorcé au second trimestre 2005 doit s'achever à fin septembre 2007. En mai 2007, après deux années d'exécution, la totalité des 12 missions de 3 à 12 jours chacune a été réalisée. Ainsi, les échantillons de sédiments (1211) et de poissons (974 de 52 espèces différentes) ont pu être collectés, au-delà même des objectifs initiaux, et ce malgré les difficultés de mise en place de ces missions de terrain (conditions météorologiques défavorables, difficultés d'accès à certaines criques...).

Sur le plan de leurs concentrations totales en mercure, tous les échantillons de sédiments et de poissons ont été analysés et de premières interprétations ont été opérées. Celles-ci permettent de dresser des cartes des concentrations en mercure total des sédiments pour la totalité de la Guyane et par bassins versant. Les résultats préliminaires sont ici présentés par secteurs au sein même de chaque bassin versant. De plus, la distribution des teneurs totales en mercure sur les 1211 échantillons est présentée dans ce présent rapport.

Une partie des échantillons de sédiments est actuellement analysée dans un laboratoire Canadien. Cette démarche permettra de conforter les analyses en mercure total sur sédiments réalisées dans le cadre de ce projet par le centre scientifique et technique du Brgm. Les résultats de ce benchmark seront connus au cours du mois de juillet.

De premières analyses granulochimiques (analyses des teneurs en mercure total en fonction de la granulométrie au sein d'un même échantillon) ont révélé que le mercure est présent dans certaines classes granulométriques et qu'il est indispensable de procéder à ce type d'analyses sur environ 10% des échantillons afin de parvenir à une interprétation détaillée des résultats. Une partie de ces analyses granulochimiques est toujours en cours actuellement et les résultats, attendus pour juillet, seront donc utilisés pour étayer l'interprétation finale de ce sujet en tenant compte des résultats de la partie « poissons ».

Tous les fichiers de données acquises sur le terrain ont été préparés et harmonisés de manière à pouvoir être intégrés dans un Système d'Informations Géographiques qui aura vocation (i) à présenter les résultats de manière synthétique et (ii) à pouvoir être utilisé par d'autres organismes travaillant sur le sujet. Ces informations seront, de surcroît, présentées et diffusées *via* un site Internet dont l'enveloppe est construite, et qui contiendra les couches de résultats ad hoc une fois ceux-ci validés et approuvés en Comité de Pilotage.

Les trois derniers mois de ce projet seront donc mis à profit pour l'interprétation finale des résultats, en tenant compte des volets « sédiments » et « poissons », ainsi que des résultats attendus de la partie granulochimique.

Différentes réunions de travail seront organisées entre les équipes participant à ce projet afin de finaliser la réflexion, en cours actuellement, destinée à définir s'il est possible de graduer un aléa de contamination mercurielle éventuellement encourue par les populations du long des fleuves guyanais.

5. Bibliographie

Bastos W.R., Oliveira Gomes J.P., Cavalcante Oliveira R., Almeida R., Nascimento E.L., Bernardi J.V.E., Drude de Lacerda L., da Silveira E.N., Pfeiffer W.C. 2005. Mercury in the environment and riverside population in the Madeira River Basin, Amazon, Brazil. *Science of The Total Environment*, In Press, Corrected Proof.

Birkett J.W., Noreng J.M.K., Lester J.N. 2002. Spatial distribution of mercury in the sediments and riparian environment of the River Yare, Norfolk, UK. *Environmental Pollution*, 116, 1, 65-74.

Boudou A., Maury-Brachet R., Durrieu G., Coquery M., Dauta C. 2006. Chercheurs d'or et contamination par le mercure des systèmes aquatiques continentaux de Guyane - Risques à l'égard des populations humaines. *Hydroécol. Appl.*, 15, 1-18.

Boujard T., Pascal M., Meunier J.F., Le Bail P.Y. 1997. Poissons de Guyane, Guide écologique de l'Approuague et de la réserves des Nouragues, INRA éditions, 219 p.

Brügmann L. 1995. Metals in sediments and suspended matter of the river Elbe. *Science of The Total Environment*. 159, 1, 53-65.

Charlet L., Boudou A. 2002. Cet or qui file un mauvais mercure. *La Recherche*, 359: 52-59.

Compeau G., Bartha R. 1985. Sulfate reducing bacteria: principal methylators of Hg in anoxic estuarine sediments. *Applied Environmental Microbiology*. 50, 498-502.

Coquery M. 1994. Biogéochimie du mercure en milieu estuarien et côtier. Thèse de doctorat. Université de Paris VI : 212 p.

Cordier S., Garel M., Mandereau L., Morcel H., Doineau P., Gosme-Seguret S., Josse D., White R., Amiel-Tison C. 2002. Neurodevelopmental investigations among methylmercury-exposed children in French Guiana. *Environ Res.*, 89: 1-11.

Domagalski, J.L. 2001. Mercury and methylmercury in water and sediment of the Sacramento River basin, California. L. *Applied Geochemistry*, 16, 15, 1677-1691.

Durrieu G., Maury-Brachet R., Boudou A. 2005. Goldmining and mercury contamination of the piscivorous fish *Hoplias aimara* in French Guiana (Amazon basin). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60(3):315-323.

Fitzgerald W.F. 1989. Atmospheric and oceanic cycling of mercury. *Chem. Oceanogra.*, 10, 151-186.

Filho S.R., Maddock J.E.L. 1997. Mercury pollution in two gold mining areas of the Brazilian Amazon. 1997. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 2-3, 231-240.

Fleming E. J., Mack E. E., Green P. G. et Nelson C.N. 2006. Mercury methylation from an expected sources : molybdate-inhibited freshwater sediments and iron-reducing bacterium. *Applied Environmental Microbiology*, 72, 457-464.

Frery N., Maury-Brachet, R., Maillot E., Deheeger M., Merona de, B., Boudou, A. 2001 - Gold mining activities and mercury contamination of native amerindian communities in french Guiana: key role of fish in dietary uptake. *Environmental Health Perspectives*, 109 (5), 1-5.

Heaven S., Ilyushchenko M.A., Tanton T.W., Ullrich S.M., Yanin E.P. 2000. Mercury in the River Nura and its floodplain, Central Kazakhstan: I River sediments and water. *The Science of The Total Environment*, 260, 1-3, 35-44.

Hylander L.D., Meili M., Oliveira L.J., de Castro e Silva E., Guimarães J.R.D., Araujo D.M., Neves R.P., Stachiw R., Barros A.J.P., Silva G.D. 2000. Relationship of mercury with aluminum, iron and manganese oxy-hydroxides in sediments from the Alto Pantanal, Brazil. *Science of The Total Environment*, 260, 97-107.

King JK, Harmon S.M., Fu T.T., Gladden J.B. 2002. Mercury removal, methylmercury formation, and sulfate-reducing bacteria profiles in wetland mesocosms. *Chemosphere*, 46, 859-870.

Kullander S.O., Nijssen H. 1989. The cichlids of Surinam. E.J. BRILL editions, 256 p.

Lechler P.J., Miller J.R., Lacerda L.D., Vinson D., Bonzongo J.C., Lyons W.B., Warwick J.J. 2000. Elevated mercury concentrations in soils, sediments, water, and fish of the Madeira River basin, Brazilian Amazon: a function of natural enrichments. *The Science of The Total Environment*, 260, 1-3, 9 87-96.

Maury-Brachet R., Durrieu G., Boudou A. 2006. Mercury distribution in fish organs and food regimes: significant relationships from twelve species collected in French Guiana (Amazonian basin) *Science of The Total Environment* 368, 1, 1, 262-270.

Pestana M.H.D., Lechler P., Formoso M.L.L., Miller J. 2000. Mercury in sediments from gold and copper exploitation areas in the Camaquã River Basin, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 13, 6, 537-547.

Piani R., Stefano Covelli and Harald Biester. 2005. Mercury contamination in Marano Lagoon (Northern Adriatic sea, Italy): Source identification by analyses of Hg phases. *Applied Geochemistry*, 20, 8, 1546-1559.

- Ramírez Requelme M.E., Ramos J.F.F., Angélica R.S., Brabo E.S. 2003. Assessment of Hg-contamination in soils and stream sediments in the mineral district of Nambija, Ecuadorian Amazon (example of an impacted area affected by artisanal gold mining). *Applied Geochemistry*, 18, 3, 371-381.
- Rémy S., P Prudent, C Hissler, J L Probst and G Kremp. 2003. Total mercury concentrations in an industrialized catchment, the Thur River basin (north-eastern France): geochemical background level and contamination factors. *Chemosphere*, 52, 3, 635-644.
- Rodrigues Filho S., J.E.L Maddock. 1997. Mercury pollution in two gold mining areas of the Brazilian Amazon. *Journal of Geochemical Exploration*, 58, 2-3, 231-240.
- Roulet M., Maury-Brachet R. 2001. Le mercure dans les organismes aquatiques amazoniens. In « Le mercure en Amazonie », Annexe 4 - IRD Editions (Paris), p.p. 204-271.
- Roulet M., Lucotte M., Canuel R., Farella N., Courcelles M., Guimarães J.R.D., Mergler D. and Amorim M. 2000. Increase in mercury contamination recorded in lacustrine sediments following deforestation in the central Amazon. *Chemical Geology*, 165, 3-4, 243-266.
- Roulet M., Guimaraes J.R.D., Lucotte M. 2001. Methylmercury production and accumulation in sediments and soils of an Amazonian floodplain; effect of seasonal inundation. *Water, Air and Soil Pollution*, 128, 1-2, 41-60.
- Shi Jian-bo, Li-na Liang, Gui-bin Jiang, Xing-long Jin. 2005. The speciation and bioavailability of mercury in sediments of Haihe River, China. *Environment International*, 31, 3, 357-365.
- Stoichev T., Amouroux D., Wasserman J.C., Point D., De Diego A., Bareille G., Donard O.F.X. 2004. Dynamics of mercury species in surface sediments of a macrotidal estuarine-coastal system (Adour River, Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59, 3, 511-521.
- Warner K.A., Bonzongo J.C.J., Roden E.E., Ward G.M., Green A.C., Chaubey I., Berry Lyons W., D Albrey Arrington. 2005. Effect of watershed parameters on mercury distribution in different environmental compartments in the Mobile Alabama River Basin, USA. *Science of The Total Environment*, In Press, Corrected Proof.
- Weber J.H. 1988. Binding and transport of metals by humic materials. In Frimmel F.H., Christman R.F. (Eds): Humic substances and their role in the environment. John Wiley & Sons, New York, 165-178.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36 009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Guyane
Domaine de Suzini – Route de Montabo
BP 552
97333 – Cayenne Cedex 2 - France
Tél. : 05 94 30 06 24