

## TRANSPORT ET DEPOT DE L'OR DANS L'AMAZONE EN CRUE

I. Verhaeghe & J. Boulègue

### RESUME

L'or a été analysé en phase dissoute et en suspension lors d'une crue de l'Amazonie (juin 1989). Les contributions dues aux principaux affluents brésiliens de l'Amazonie ont aussi été étudiés. Les concentrations sont élevées et dépassent 100 pM au niveau des zones inondables (Varzea). Les flux correspondants sont compris entre 2 et 6 g Au/s. Le rôle des espèces organiques transitoires, produites lors de l'inondation du Varzea, est discuté en relation avec les problèmes de transport de l'or.

Les résultats acquis et ceux déjà obtenus sur le Congo permettent de préciser le cycle géochimique de l'or. En particulier un nouveau temps de résidence de l'or dans les océans est calculé : 140 ans.

### ABSTRACT

Gold was analyzed under dissolved and suspended species during a period of high water (June 1989) of Amazon river. The contributions from the main tributaries of Amazon river were also studied. Gold is found in high concentration : above 100 pM in the low lands known as "Varzea". Fluxes of gold in the river are then in the range 2-6 g Au/s. Transient organics are produced by Varzea plants during high water periods. Their role in the transportation of gold is discussed.

The results of this study as well as of a previous study of the Congo river enable to improve the data on the geochemical cycle of gold. A new residence time of gold in the ocean have been computed : 140 years.

### INTRODUCTION

Les fleuves sont considérés par FALKNER (1989) comme la source principale de l'or dans les océans; leur contribution serait bien supérieure aux apports hydrothermaux des rides océaniques. Cet auteur s'est fondé pour établir ce résultat sur les teneurs moyennes des eaux de rivières et de fleuves des Etats-Unis (McHUGH, 1988). Afin d'appréhender plus précisément le problème du bilan global de l'or, nous nous sommes intéressés à l'Amazonie, le plus grand fleuve mondial en superficie du bassin et en importance de ses apports à l'Océan.

Nous avons pu obtenir des échantillons d'eau et de matière en suspension récoltés lors d'une crue de l'Amazonie. Ces échantillons permettent de discuter des processus de transport et de dépôt de l'or.

### 1. GENERALITES SUR LE BASSIN DE L'AMAZONE

Nous présentons des caractéristiques globales sur le climat et l'hydrologie de la zone étudiée. Pour plus de renseignements, le lecteur pourra se reporter à des documents hydrologiques spécifiques (NKOUNKOU, 1989; SIOLI, 1984).

#### 1.1. Situation et description partielle

Le bassin de l'Amazonie est situé dans la région équatoriale du continent sud-américain. Le Solimoes-Amazonie traverse le continent sud-américain d'ouest en est sur 7 000 kms. Il prend sa source dans les Andes à 5 238 m d'altitude puis dévalle sur 1 000 kms les pentes de la Cordillère qui fournit plus de 80 % de la charge solide de l'Amazonie (GIBBS, 1967). Le fleuve traverse ensuite la plaine amazonienne à 200 m d'altitude en moyenne. A l'embouchure du Rio Negro soit à 1 500 kms de la mer, l'altitude du fleuve n'est plus que de 15 m. La pente faible de son cours jusqu'à l'estuaire engendre la formation de nombreux méandres et lacs. Ces vastes plaines bordent le fleuve de zones inondables appelées "varzea" qui occupent 50 000 à 60 000 km<sup>2</sup> et sont inondées pendant plusieurs mois en période de hautes eaux. Le bassin versant est recouvert, à plus de 80 %, par une forêt sempervirente humide alors que les boucliers guyanais et brésiliens, qui bordent la plaine amazonienne au nord et au sud, se différencient par leur végétation de type savane.

## 1.2. Hydrologie

Un débit annuel moyen de 156 000 m<sup>3</sup> confère à l'Amazone la première place parmi les fleuves mondiaux. Ceci s'explique par l'étendue de son aire de drainage et par l'importance des précipitations annuelles moyennes (2 300 mm).

L'Amazone, située dans la zone intertropicale, possède des affluents à régime équatorial, principalement ceux de la rive gauche, et d'autres à régime tropical, ceux de la rive droite. Le bassin est soumis à un cycle hydrologique résultant du mélange de ces eaux. Le bassin versant est situé principalement dans l'hémisphère sud, ce qui contrôle le cycle hydrologique. Ainsi l'Amazone à Obidos est caractérisé par deux saisons hydrologiques : une période de hautes eaux (maximum en mai-juin) et un étiage en novembre. Le cycle peut être perturbé, par exemple par le retard d'une crue ou d'une décrue d'un affluent. Mais la situation et l'étendue du bassin versant dans la région équatoriale confère à ce fleuve un régime régulier que ce soit vis-à-vis des variations annuelles ou des variations interannuelles. Ainsi le rapport du débit moyen de l'année la plus humide à celui de l'année la plus sèche est de 1,32, sur 26 années d'observations, et le rapport du débit moyen des hautes eaux aux basses eaux, sur une même année, est de 2,26 (SALATI et MARQUES, 1984).

L'effet des crues est cependant considérable. La différence entre le niveau des hautes eaux et des basses eaux est particulièrement importante, pouvant atteindre 10-12 m à l'embouchure du Rio Negro et 6-7 m à Santarem. Mais les oscillations du niveau du fleuve ne sont pas synchrones avec les saisons climatiques : il existe un temps de latence entre la pluie et la montée des eaux dû aux origines différentes des crues. En particulier dans la partie la plus à l'est de l'Amazone, ce retard est estimé à 2 mois.

D'autre part, il faut noter l'importance de l'évapotranspiration des forêts tropicales et son rôle dans la formation des pluies. Ainsi le bassin amazonien reçoit 11,87.10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> d'eau par an dont 6,43.10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> sont évaporés dans l'atmosphère. La vapeur d'eau formant la pluie dans cet environnement aurait pour source l'océan à 46 % et à 54 % l'évapotranspiration générée par la forêt (SALATI et MARQUES, 1984).

## 1.3. Affluents

Les principaux affluents sont, par ordre d'importance, le Rio Negro, le Rio Madeira, le Rio Tapajos et le Rio Xingu, qui, à eux quatre, contribuent pour moitié au débit du fleuve. Les affluents diffèrent les uns des autres par leurs origines mais également par les propriétés physico-chimiques de leurs eaux. Trois types peuvent être ainsi distingués selon leur apparence et leur pH.

- Les "rivières blanches" sont relativement turbides, leur transparence est estimée à 0,1-0,5 m et leur pH est de 6,2-7,2. Elles ont en général une zone de drainage dans les Andes et sont originaires, soit des régions à latosol sur le bouclier brésilien, soit des terrains tertiaires sablo-argileux des Andes. Ce sont les rivières les plus répandues, parmi lesquelles nous pouvons citer le fleuve principal, le Rio Solimoes-Amazone et le Rio Madeira. La composition chimique de leurs eaux en éléments majeurs est équivalente aux moyennes globales des rivières du globe (MOLINIER et al., 1994).

- Les "rivières claires" sont transparentes, (transparence mesurée entre 1,1 et 4,3 m) et leur pH est de 4,5-7,8. Le Rio Tapajos est un exemple des fleuves à eaux claires. Elles ont la propriété d'avoir des eaux peu chargées par rapport aux "eaux blanches".
- Les "rivières noires" sont transparentes, mais de couleur brune, (transparence variant entre 1,3 et 3,9 m) et leur pH varie de 3,8 à 4,9. Le Rio Negro appartient à cette dernière catégorie. Elles se situent principalement dans les régions plates et prennent généralement leur source dans des podzols (PAOLINI, 1979). Il en résulte que les "eaux noires" sont appauvries en électrolyte et plus diluées que les "eaux blanches". Cependant elles présentent une forte concentration en matière organique.

## 1.4. Transport de matière

L'Amazone transporte des quantités relativement importantes de sédiments en suspension (MOLINIER et al., 1994). Ainsi près de l'embouchure du Rio Tapajos, affluent de l'Amazone, la charge solide atteint 50 mg/l en saison sèche et 150 mg/l en saison des hautes eaux, ce qui équivaut à une valeur annuelle moyenne de 12.10<sup>8</sup> t (GORDEEV et al., 1985). Cependant malgré

l'importance de son débit et de la surface de son bassin, l'Amazone n'occupe que la troisième place après le Gange-Brahmapoutre et le Huang Ho (ou Fleuve Jaune), en ce qui concerne sa charge en matière solide transportée. Ceci peut s'expliquer par le fait que 75 % de son bassin hydrographique est recouvert d'une forêt dense, établie sur un terrain tectoniquement stable, ce qui limite l'érosion, et par la faiblesse des pentes du profil sur la plus grande partie de son bassin versant.

## 2. ECHANTILLONNAGE ET MESURES

Les problèmes spécifiques à l'échantillonnage des grands fleuves sont discutés en annexe 1.

### 2.1. Prélèvement des échantillons

La figure n° 1 indique les différents points de prélèvements dont la localisation exacte est donnée en annexe 2. Dix neuf échantillons ont été prélevés sur l'Amazone et ses affluents entre Manaus et Santarem, soit sur une distance d'environ 700 kms sur le cours principal. Cet échantillonnage a été effectué par B. DUPRE et F. SYMBILLE (Lab. Géoch. Cosmochim. IPGP) du 18 au 22 juin 1989. Le mois de juin correspond à la fin de la période des pluies et au maximum des eaux à Manaus. On ne dispose pas de données quantitatives sur la crue de 1989, mais elle a la réputation d'avoir été importante.

L'échantillonnage a été réalisé à partir d'une barque motorisée et par pompage à l'aide d'une pompe péristaltique et d'un tuyau en téflon équipé d'une crépine afin d'éliminer l'apport de feuille ou de tout autre débris. La profondeur de prélèvement, estimée inférieure à 2 m, a été constante. Les prélèvements sur les affluents ont été effectués après deux heures de navigation en amont de la confluence.

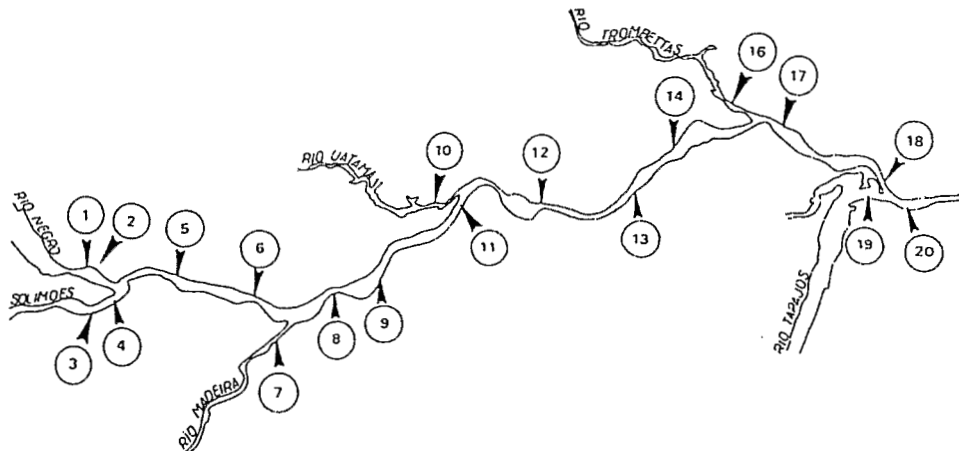


Figure n° 1

Points de prélèvements et numérotation des échantillons prélevés sur l'Amazone.

### 2.2. Conservation des échantillons

Il importe de s'assurer que la concentration en or ne puisse évoluer entre le prélèvement et l'analyse. En premier lieu, le contenant peut affecter la concentration, soit en contaminant la solution à stocker, soit en perturbant les processus et les équilibres chimiques, physiques et biologiques. Ainsi FALKNER (1989) a constaté que le lavage à l'eau régale des bouteilles en polyéthylène entraînait la formation de sites préférentiels d'adsorption de l'or. Dans ces conditions une solution conservée sans acide perd 10 % de l'or sur les parois en moins de cinq heures; acidifiée avec HCl, elle n'est stable qu'un mois. BENES et SMETANA (1966) montrent une adsorption minérale de l'or dans des solutions acidifiées avec de l'acide chlorhydrique à pH 1, les

flacons en polyéthylène étant lavés à l'HCl et rincés à l'eau distillée. D'autre part, l'adsorption de l'or sur les parois est, selon ces auteurs, réversible après un rinçage à l'eau régale. Ils proposent que le mécanisme d'adsorption de l'or est déterminé par l'état d'oxydation de l'or, soit par exemple des chlorures hydrolysés de Au (III). Cependant l'existence de tels composés n'est qu'une hypothèse. Ils supposent également que la réduction de l'or adsorbé en or métallique a lieu secondairement en surface. Cette idée a été reprise par FALKNER (1989) qui propose la réduction de Au(III) en Au(I) en surface. Cependant ces phénomènes d'oxydo-réduction n'expliqueraient pas l'augmentation de l'adsorption avec le pH.

### 2.3. Mesure des matières en suspension (MES)

Les MES correspondent à la quantité de matière retenue sur le filtre après filtration d'une quantité d'eau donnée. Pour les échantillons étudiés, cette quantité a été déterminée par pesée après grattage des filtres sur lesquels 10 litres de solution avaient été filtrés.

### 2.4. Mesure des débits

Les débits de l'Amazone et de ses affluents n'ont pu être estimés lors de la campagne de prélèvements et nous utiliserons donc les débits de la littérature pour interpréter les résultats.

### 2.5. Analyses

Les échantillons prélevés spécifiquement pour l'or ont été analysés au CEA (Fontenay-aux-Roses) avec l'aide de B. REMY, par ETA-LEAFS, selon la méthode de REMY et al. (1991); limite de détection  $10^{-13}$  Mole.Kg<sup>-1</sup>. Toutes les analyses de matières particulaires ont été effectuées par le laboratoire d'activation neutronique Pierre Sue à Saclay. Le mercure dissous a été analysé sur certains échantillons par Absorption Atomique après hydruration (limite de détection :  $10^{-10}$  Mole.Kg<sup>-1</sup>).

## 3- RESULTATS

Les concentrations en or dissous et en or lié aux matières en suspensions dans les échantillons prélevés entre Manaus et Santarem sont présentés en tableau n° 1. Les figures n° 2 et 3 indiquent respectivement les concentrations en or dissous et en or lié aux MES dans l'Amazone et ses affluents dans la région étudiée.

Tableau n° 1

Concentrations en or dissous et en or lié aux MES exprimées en picomole par litre (pM) dans les échantillons prélevés dans l'Amazone et ses affluents entre Manaus et Santarem. MES désigne les matières en suspension en mg/l. Il n'y a pas eu de MES disponible pour les échantillons n° 2, 3 et 9.

Ech.	Localisation	pH	MES	Au dissous	Au lié aux MES
1	Rio Negro	4.85	4.4	25	4.2
2	Affluent du Rio Negro	4.43		30	
3	Lac			162	
4	Rio Solimoes	7.10	46.6	61	2.1
5	Amazone	5.77	5.7	91	1.5
6	Amazone	6.79	31.2	51	1.9
7	Rio Madeira	6.73	58.9	91	1.1
8	Amazone	6.78	37.3	66	7.1
9	Amazone	6.81		152	
10	Rio Uatuma	6.46	7.1	15	1.1
11	Amazone	6.60	16.6	183	6.1
12	Amazone	6.75	24.5	178	5.3
13	Amazone	6.86	31.1	122	8.3
14	Marais	7.06	6.9	71	2.1
16	Rio Trombetas	6.10	11.5	35	5.0
17	Amazone	6.78	21.8	46	2.2
18	Amazone	6.86	83.1	41	8.9
19	Rio Tapajos	6.68	5.5	20	0.7
20	Amazone	6.89	29.7	112	1.2

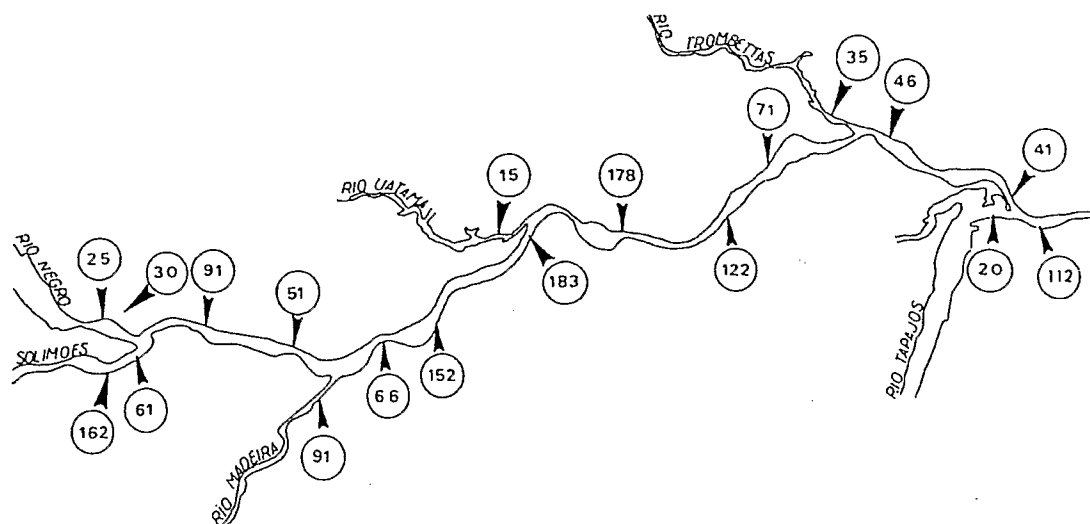


Figure n° 2

Concentrations en or dissous exprimées en picomole par litre (pM).

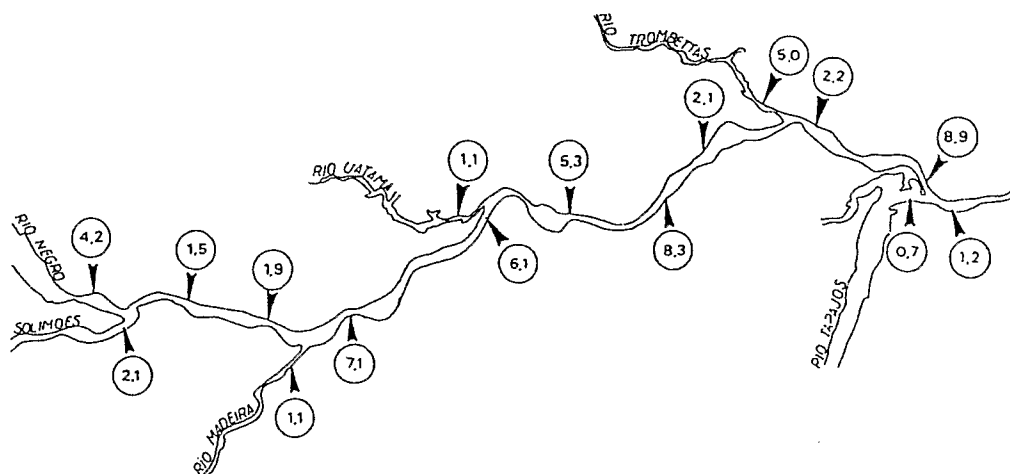


Figure n° 3

Concentrations en or lié aux MES exprimées en picomole par litre (pM).

Les teneurs en or dissous ne sont pas uniformes sur le cours principal du fleuve et varient de 41 à 183 pM avec une concentration moyenne de 96 pM, la valeur la plus faible correspondant à l'Amazone avant le Rio Tapajós et la valeur la plus élevée à l'Amazone près de Tobocal. Les affluents, à l'exception du Rio Madeira (91 pM), ont des concentrations plus faibles : le Rio Negro, 25 pM, le Rio Uatuma, 15 pM, le Rio Trombetas, 35 pM et le Rio Tapajós, 20 pM. Deux marais ont été analysés, l'un prélevé sur le Solimoes, c'est-à-dire sur l'Amazone avant Manaus, contient 162 pM, alors que le second, prélevé sur l'Amazone en amont de la confluence avec le Rio Trombetas, contient 71 pM. Il est à noter que dans ce deuxième marais l'eau n'était pas stagnante.

En ce qui concerne l'or lié aux MES, les concentrations sont moins dispersées et varient de 1,2 à 8,9 pM sur le fleuve. Les teneurs en or lié aux MES dans les affluents sont du même ordre : le Rio Negro, 4,2 pM, le Madeira, 1,1 pM, le Rio Uatuma, 1,1 pM, le Rio Trombetas, 5 pM et le Rio Tapajós, 0,7 pM.

## 4- DISCUSSION

### 4.1. Anomalies des concentrations en or

McHUGH (1988) a analysé l'or dans cent trente-deux échantillons prélevés dans des rivières ou des fleuves provenant principalement des Etats-Unis, mais également d'Australie, de Nouvelle Zélande, du Chili et des régions du Sud Pacifique. Il apparaît que la moyenne des concentrations en or dissous est de l'ordre de quelques pM. Or la moyenne des concentrations que nous avons mesurées dans l'Amazone est de 96 pM. Ceci montre un enrichissement en or dissous significatif de l'Amazone par rapport aux rivières mondiales.

Il nous a semblé en premier lieu important de vérifier dans chacun des échantillons la concentration en mercure. En effet, le mercure, formant avec l'or un amalgame, est fortement utilisé pour l'orpaillage dans les affluents de l'Amazone et des apports liés pourraient perturber nos résultats. MARTINELLI et al. (1988) ont ainsi répertorié des contaminations sensibles en mercure dans les poissons, plantes et sédiments recueillis dans le Rio Madeira et ont supposé une contamination des eaux. Cependant les concentrations en mercure que nous avons obtenues dans chacune des solutions prélevées étaient inférieures à 100 ppt ce qui correspond à la moyenne dans les eaux de rivières mondiales, soit 74 ppt (HOLLAND, 1978). Il semble donc que des anomalies en mercure ne puissent expliquer les anomalies en or. Ceci bien entendu dans la mesure où le mercure ne précipite pas rapidement après son relargage dans les fleuves. On peut aussi rejeter l'argument de pollution, car les teneurs élevées en or ne correspondent pas à l'aval des zones riches en or au Brésil (Boa Vista, Porto Vehlo, Tapajos). En ce qui concerne le bassin de l'Amazone, il possède des gisements aurifères; les échantillons dont nous disposons dans notre étude correspondent à des prélèvements éloignés des zones aurifères d'une distance supérieure à 500 kms. Au regard de nos résultats les affluents qui drainent ces zones dans la première partie de leur cours ne présentent aucun enrichissement en or à leur point de confluence avec l'Amazone. Par exemple, la concentration de 20 pM du Rio Tapajos correspond même à la valeur la plus faible mesurée sur le bassin, alors que cet affluent draine, dans la première partie de son cours, une zone aurifère. Ainsi il semble que l'enrichissement des eaux, dû à la proximité de gisements d'or, soit un phénomène local et son influence ne paraît pas se propager à longue distance.

Cependant l'enrichissement observé dans le bassin amazonien ne peut s'expliquer que par la présence d'une source d'or. La présence de la Cordillère des Andes est un facteur primordial d'influence sur la composition des eaux de l'Amazone. Ses apports définissent en grande partie la composition en éléments dissous et particulaires du cours principal et de certains de ses affluents. L'enrichissement en or dans ce réseau hydrographique, semble pouvoir être attribuable à des produits d'érosion de cette chaîne de montagnes. Leur transport est envisageable en raison des fortes variations de pentes à l'entrée du bassin. Nous ne disposons pas de renseignements suffisants pour déterminer une source aurifère plus précisément.

### 4.2. Comportement de l'or sur le cours du fleuve

Les concentrations en or dissous dans les affluents de l'Amazone sont inférieures à la moyenne des concentrations sur le cours principal. Les concentrations sont de 25 pM sur le Rio Negro, 15 pM sur le Rio Uatuma, 35 pM sur le Rio Trombetas et 20 pM sur le Rio Tapajos alors que la moyenne sur l'Amazone entre Manaus et Santarem est de 96 pM. Seul le Rio Madeira a une concentration équivalente à celle du Rio Solimoes, il a aussi été montré que ces deux fleuves avaient des compositions en éléments dissous comparables (FERREIRA et al., 1988).

Disposant des concentrations en or dans la phase dissoute et dans la phase particulaire, nous pouvons établir des bilans de flux d'or le long de l'Amazone. La figure n° 4 indique chacun de ces flux calculés comme le produit de la concentration par le débit au point prélevé. Ce calcul est entaché systématiquement d'une incertitude puisque nous ne disposons pas des valeurs des débits au moment des prélèvements. Les valeurs des débits qui ont été utilisés sont répertoriés dans le tableau n° 2 et correspondent aux valeurs moyennes mesurées en juin. Nos échantillons ont été prélevés lors d'une crue forte et les résultats seront donc sous-estimés. Mais il nous a été impossible d'extrapoler les débits de tous les affluents à cette période, les apports des uns et des autres provenant de l'hémisphère nord ou sud ne subissant pas les mêmes variations hydrologiques.

Au regard de ces flux, nous nous sommes particulièrement intéressés à la conservation de l'or autour de différentes confluences. Chacune d'elles va être détaillée ci-dessous :

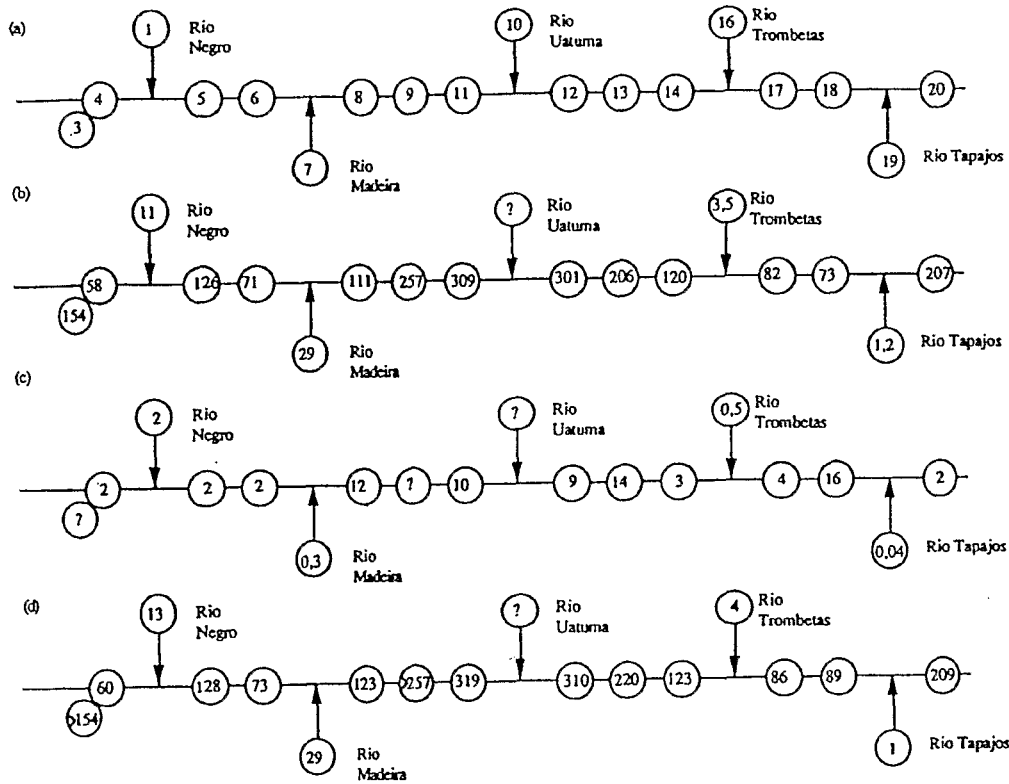


Figure n° 4

Flux de l'or le long de l'Amazonie entre Manaus et Santarem exprimées en  $10^{-4}$  mol/s. (a) numéros des échantillons, (b) flux d'or dissous, (c) flux d'or lié aux MES, (d) flux d'or total.

Tableau n° 2

Débits de l'Amazonie et de ses affluents.

Fleuve	Débit en $m^3 \cdot s^{-1}$	Référence
Rio Solimoes	95 000	Richey (1990)
Rio Negro	44 000	Furch (1987)
Rio Madeira	32 000	Furch (1987)
Rio Trombetas	10 000	Ertel (1986)
Rio Tapajos	6 000	Furch (1987)

#### 4.2.1. - La confluence du Rio Negro :

Les flux calculés autour de la confluence du Rio Negro et du Rio Solimoes permettent de montrer une conservation de l'or total. La somme des flux d'or du Rio Negro et du Rio Solimoes correspond au flux dans l'Amazonie après la confluence,  $7,3 \cdot 10^{-3}$  mol/s, si on exclut l'échantillon 5, prélevé juste après Manaus et présentant un flux nettement supérieur de  $12,3 \cdot 10^{-3}$  mol/s. Cet enrichissement ponctuel peut s'expliquer soit par l'influence de la turbulence sur la représentativité de l'échantillon, celui-ci ayant été recueilli entre deux îles (voit Annexe 1), soit par la présence d'une masse d'eau correspondant à des eaux de lessivage des plaines inondées enrichies en or, et donc plus susceptible d'être échantillonnée entre des îles.

Les concentrations en or lié aux MES sont très inférieures à celles dans la phase dissoute (tableau 1). La concentration est plus grande dans le Rio Negro, mais restant faible, elle n'affecte pas les bilans.

En amont de la confluence du Rio Negro, l'échantillon 3 prélevé dans un lac à l'intérieur d'un marais montre un enrichissement en or dissous significatif par rapport au Rio Solimoes. En effet

cet échantillon renferme 162 pM d'or dissous alors que le Rio Solimoes n'en contient que 61 pM. Ainsi le rôle de la matière organique, dont le taux est élevé dans un marais, semble pouvoir être invoqué dans les processus de transport de l'or vers l'Amazonie. Le même comportement a été mis en évidence dans le bassin du Congo par BENEDETTI et BOULEGUE (1990).

#### 4.2.2. - La confluence du Rio Madeira :

La somme des flux totaux de l'Amazonie et du Rio Madeira est de  $10,2 \cdot 10^{-3}$  mol/s alors que le flux de l'Amazonie après la confluence est de  $12,3 \cdot 10^{-3}$  mol/s. Sachant que l'incertitude sur les mesures ETA-LEAFS a été estimée à 10 % sur les faibles teneurs (REMI et al., 1991) et que les variations des débits de l'Amazonie à Obidos, au mois de juin sur plusieurs années, peuvent atteindre 18 % (RICHEY et al., 1990), ces deux valeurs paraissent équivalentes. Ainsi l'or semble donc se conserver également au niveau de cette confluence.

L'influence du Rio Uatuma sur les flux d'or transporté a été négligée, cet affluent n'ayant pas un débit important.

#### 4.2.3. - La confluence du Rio Trombetas :

Au niveau de la confluence du Rio Trombetas et de l'Amazonie, on constate une baisse relativement sensible des flux d'or transporté par rapport aux points en aval. La somme des flux avant la confluence est de  $12,3 \cdot 10^{-3}$  mol/s alors que le flux de l'Amazonie après la confluence est de  $8,6 \cdot 10^{-3}$  mol/s. La différence entre ces deux valeurs semble bien supérieure à l'incertitude liée aux erreurs analytiques ou aux variations des débits. D'autre part la valeur en aval de cette confluence est confirmée par un deuxième prélèvement (Echantillon 18). Cette baisse sensible dans la phase dissoute pourrait être attribuable à une précipitation de l'or sous l'effet du changement d'un paramètre physico-chimique. Certes les données de pH et de température varient peu autour de la confluence mais il nous faudrait disposer de données plus complètes telles que le taux de la matière organique le long du fleuve pour envisager un mécanisme de précipitation.

#### 4.2.4. - La confluence du Rio Tapajos :

Les échantillons autour de la confluence du Rio Tapajos et de l'Amazonie ne permettent pas de montrer une conservation du flux d'or transporté le long du fleuve. En effet la somme des flux avant la confluence est de  $9 \cdot 10^{-3}$  mol/s et le flux après la confluence est de  $20,9 \cdot 10^{-3}$  mol/s. Cet enrichissement peut être considéré comme un phénomène local, un seul échantillon ayant été prélevé après la confluence et dans de mauvaises conditions puisqu'il a été prélevé proche de la rive (voir Annexe 2).

En conclusion de ce paragraphe, nous pouvons indiquer que l'examen des flux d'or transporté dans l'Amazonie nous permet de constater une conservation de l'or le long du fleuve dans les zones de confluence à l'exception de la confluence du Rio Trombetas, un transport prédominant de l'or sous forme dissoute et enfin le rôle présumé de l'inondation des zones basses sur la libération de l'or.

### 4.3. Comportement de l'or dans les varzea

Malgré la conservation locale de l'or observée à certaines confluences le long de l'Amazonie, on observe une grande variation des concentrations et un enrichissement en or dans les échantillons 9, 11, 12 et 13; les flux atteignant des valeurs supérieures à  $35 \cdot 10^{-3}$  mol/s. Or ces échantillons ont tous été prélevés à proximité des zones basses inondées. L'hypothèse de l'influence de l'inondation des plaines bordant le fleuve sur la libération de ligands de l'or à partir de systèmes biologiques peut être invoquée pour expliquer cet enrichissement en or. Il est à noter que cet enrichissement ne s'observe que dans la phase dissoute. Donc les espèces responsables de ces transferts d'or doivent être de taille inférieure à  $0,2 \mu\text{m}$ . D'autre part en considérant les résultats de l'échantillon 14 ( $12 \cdot 10^{-3}$  mol/s), il semble que l'or reprécipite et que les phénomènes d'enrichissement observés dans les varzea soient locaux et pourraient ne pas constituer une source aurifère importante pour les transferts d'or de l'Amazonie vers l'Océan.

### 4.4. Rôle de la matière organique dans le transport de l'or dans l'Amazonie

RICHEY et al., (1990); NORDIN et MEADE, (1986) proposent un rôle prédominant pour la matière organique dans le transport de l'or. Cependant les fleuves de type "black river" comme le Rio Negro et le Rio Uatuma présentent des concentrations en or particulièrement faibles en dépit



de leurs fortes teneurs en matière organique et de leur passage dans les régions aurifères connues. Ainsi il serait intéressant de comparer la teneur et la composition de la matière organique dans ces fleuves et dans les zones basses inondées afin d'en tirer des conclusions sur le rôle de la matière organique dans le comportement de l'or. Deux cas de figures peuvent se présenter :

- soit les zones basses contiennent une quantité de matière organique supérieure aux "black rivers". Dans ce cas la matière organique dans sa globalité peut être considérée comme agent complexant permettant de mobiliser l'or.
- soit dans le cas contraire, il faut envisager l'intervention d'un complexe plus spécifique que la globalité de la matière organique, lié aux zones basses et qui serait susceptible de mobiliser une quantité suffisante d'or. L'hypothèse du rôle de l'inondation comme événement générateur de la libération de l'or par son influence sur la végétation semblerait plausible dans ce deuxième cas.

Les tableaux 3 et 4 indiquent respectivement les concentrations du carbone organique particulaire et dissous dans quelques uns des échantillons fournis par J. DAGAUD (Lab. Phys. Chim. Mar., UPMC). Aucune corrélation ne semble pouvoir se dégager entre ces teneurs et les concentrations en or. Mais d'une part, nous ne disposons d'aucune valeur des teneurs en carbone organique dissous sur les échantillons des zones basses correspondant aux prélèvements les plus riches en or. D'autre part la limite entre le carbone dissous et le carbone particulaire a été fixée à 0,7  $\mu\text{m}$  alors que la limite de filtration pour l'or a été de 0,2  $\mu\text{m}$ . Ainsi aucun élément supplémentaire ne peut aider à confirmer l'hypothèse de l'inondation comme paramètre prédominant de la mobilisation biologique de l'or sous forme de complexe organique dissous.

Tableau n° 3

Concentrations en carbone organique particulaire (COP) comparées à celles de l'or lié au MES.

Ech.	Localisation	MES en mg/l	Volume filtré (l)	COP mg/l	COP (%)	Au lié au MES (pM)
1	Rio Negro	1,86	0,7	0,54	29,0	4,2
2	Affluent du Rio Negro	2,06	0,7	0,55	23,0	
4	Rio Solimoes	26,5	0,5	0,70	2,6	2,1
6	Amazone	24,3	0,5	0,85	3,5	1,9
7	Rio Madeira	47,2	0,25	0,86	1,8	1,1
10	Rio Uatuma	6,75	0,5	1,03	15,3	1,1
14	Marais	4,52	0,7	0,37	8,2	2,1
16	Rio Trombetas	9,29	0,5	1,13	12,1	5,0
19	Rio Tapajos	4,91	0,75	0,36	7,3	0,7

Tableau n° 4

Concentrations en carbone organique dissous (COD) comparées à celles de l'or dissous.

Ech.	Localisation	COD (mg/l)	Au dissous (pM)
2	Affluent du Rio Negro	7,27	30
7	Rio Madeira	4,93	91
14	Marais	4,85	71
19	Rio Tapajos	2,75	20

#### 4.5. Transfert et stockage de l'or dans les varzea

Les paragraphes précédents ont montré un enrichissement significatif de l'Amazone en or dans les zones en relation avec les zones basses inondées, appelées varzea.

Il convient de calculer la quantité d'or libérée par les varzea pendant la crue étudiée. La concentration en or dissous dans l'Amazone étant de 50 pM et celles dans les zones inondables étant de 180 pM, nous considérerons que les varzea apportent 130 pM. D'autre part selon SIOLI (1984), l'amplitude de la variation du niveau des eaux lors des crues étant de 5 à 15 m (nous prendrons 10 m) et la surface des varzea étant de 60 000 km<sup>2</sup>, le volume d'eau sur les varzea est estimé à 300 km<sup>3</sup>. On en déduit ainsi qu'une quantité minimale de 8 tonnes d'or est libérée par les varzea pendant la période de crue dans le cas où l'on imagine que l'eau des varzea n'alimenterait

pas l'Amazone. La quantité d'or est plus importante si le flux de l'Amazone entraîne l'eau des varzea et si donc elles constituent la source d'or expliquant les augmentations locales de flux de l'Amazone. Ceci suppose l'existence d'une source d'or dans le sédiment inondable des varzea.

Nous pouvons envisager un premier processus dans lequel la source d'or ne serait pas permanente mais cyclique, l'or dissous, puisé dans le sédiment lors de l'inondation, est dans ce modèle reprécipité dans la zone des varzea. Ce modèle implique un état stationnaire de la quantité d'or dans les varzea ainsi que dans le cours principal du fleuve en dehors des zones basses, ce qui est en accord avec les flux d'or calculés à partir de nos mesures (Figure n° 4). Il est alors possible de calculer la concentration minimale d'or que doit contenir le sol en supposant que tout l'or qu'il renferme est libéré lors de l'inondation. Ainsi si l'on estime que le sol est affecté sur une profondeur de 10 cm par ce phénomène et que sa densité est de 2 Kg/l, cette concentration minimale est de 0,5 ppb, ce qui est peu pour un sédiment. Si l'on considère que le rendement de mise en solution de l'or au moment de l'inondation est seulement de 0,1 %, la concentration dans le sol doit alors être de 500 ppb ce qui correspond à un environnement sédimentaire enrichi. En supposant une valeur moyenne de l'or de 3 ppb (moyenne des roches sédimentaires) dans les sédiments des varzea, un taux d'extraction de 38 % peut être calculé. Un tel taux exigerait un agent complexant très efficace.

Une autre possibilité serait de supposer que les 8 tonnes d'or (quantité minimale contenue dans l'eau des varzea) proviennent du transport des sédiments des varzea, conséquence de l'inondation. On peut alors calculer la concentration minimale que doivent renfermer ces sédiments en prenant comme hypothèse que tout l'or présent dans les sédiments est mis en solution lors de cette altération. En considérant que 10 mètres d'eau recouvrent ces sédiments, que le taux d'érosion est de 10 cm pour 10 000 ans et que leur densité est de 2 Kg/l, cette concentration doit être de 12 ppm ce qui semble trop élevé. Cette source d'or statique liée à la nature du sédiment des varzea semble donc difficilement envisageable pour expliquer les concentrations élevées mesurées dans les varzea.

Au regard de ces calculs et des observations sur le comportement de l'or de long de l'Amazone, il semble donc qu'il existe un processus cyclique d'apport, de précipitation, de mise en solution et de reprécipitation de l'or au sein des varzea; ce qui suppose le transport de l'or sous forme de complexe instable à longue distance afin d'expliquer les concentrations élevées obtenues dans les varzea et plus faibles en aval des varzea.

#### 4.6. Cycle global de l'or

Dans ce dernier paragraphe, nous souhaitons discuter du bilan géochimique global de l'or afin de déterminer son temps de résidence.

##### 4.6.1. Apport des rivières et des fleuves à l'Océan :

Considérons en premier lieu l'apport de l'Amazone à l'Océan au regard des résultats que nous avons établis dans cette étude. Il semble que cette quantité d'or soit difficile à estimer car elle doit être pondérée par les variations saisonnières. En effet si l'on suppose que la libération de l'or est un phénomène lié aux crues, nous ne pouvons considérer les concentrations obtenues comme les moyennes annuelles des teneurs en or dans le fleuve. Il importerait d'analyser des échantillons prélevés en période de basses eaux.

Nous pouvons malgré tout calculer une quantité approximative d'or exportée par l'Amazone vers l'océan en considérant l'échantillon 18 comme représentatif, étant le plus en aval, et n'étant pas associé à une zone basse et recueilli dans de bonnes conditions contrairement à l'échantillon n° 20. L'échantillon n° 20 n'est pas retenu comme référence, sa concentration particulièrement élevée n'ayant pas été confirmée par un deuxième prélèvement dans la même partie du fleuve. Le produit de la concentration en or de l'échantillon 18, soit 50 pM, et du débit moyen du fleuve soit 175 000 m<sup>3</sup>/s nous permet de trouver une quantité de  $2,7 \cdot 10^5$  mol/an ou 54t/an d'or exportée par l'Amazone dans l'océan. Ce chiffre correspond sans doute à un maximum. En tenant compte de la variabilité temporelle du débit de l'Amazone à Obidos, on a une incertitude de l'ordre de 10t/an.

D'autre part si l'on suppose que les autres fleuves mondiaux ont une concentration en or équivalente à celle établie par McHUGH (1988) soit 5 pM et sachant que leur débit (HOLLAND, 1978) est de  $4,5 \cdot 10^{16}$  l/an, le flux d'or exporté à l'océan est de  $2,2 \cdot 10^5$  mol/an. Ainsi selon ce calcul, l'apport de l'Amazone serait équivalent à celui des rivières mondiales.

#### 4.6.2. Apport des flux hydrothermaux

les apports hydrothermaux en or à l'océan sont selon FALKNER (1989) compris entre  $8,5.10^3$  et  $5,8.10^4$  mol/an et selon BENEDETTI et BOULEGUE (1990) égaux à  $3.10^3$  mol/an.

#### 4.6.3. Apport des flux atmosphériques

Les apports atmosphériques seront négligés. En effet les valeurs fournies par la littérature correspondent à des environnements spécifiques tels que les aérosols volcaniques et ne permettent pas d'extrapoler sur les aérosols de la surface du globe.

#### 4.6.4. Temps de résidence

Le temps de résidence peut être calculé comme le rapport de la quantité totale d'or dissous dans l'eau de mer sur le flux total d'or exporté par an vers l'océan. Ainsi suivant les différents flux indiqués précédemment et considérant la quantité d'or dans l'eau de mer établie par FALKNER (1989),  $6,9.10^7$  moles, le temps de résidence de l'or est de l'ordre de 140 ans. Précédemment BROECKER et PENG (1982) ont publié un temps de résidence pour l'or de  $9,7.10^4$  ans, tout en indiquant qu'il tenait compte d'une concentration incertaine en or dans l'eau et qui s'est avérée élevée au regard de l'étude FALKNER (1989).

### 5. CONCLUSION

Cette étude de l'Amazone présente l'intérêt de comporter des analyses d'or inédites et par une méthode dont la fiabilité a été démontrée. Il apparaît ainsi un enrichissement significatif des eaux de l'Amazone entre Manaus et Santarem par rapport aux eaux des rivières du continent nord-américain. D'autre part les zones les plus enrichies en or correspondent aux zones basses inondées pendant les crues. Ainsi l'hypothèse de l'inondation comme source de stress sur la végétation permettant la libération de l'or semble pouvoir être invoquée pour expliquer le comportement de l'or le long de l'Amazone en période de crue. Il semble au regard des résultats obtenus que le phénomène d'enrichissement en or soit un phénomène local et qu'un transport à longue distance de l'or ne soit pas mis en évidence.

### REMERCIEMENTS

B. DUPRE et F. SEMBILLE (LGP, IPGP) nous ont fourni les échantillons d'eau de l'Amazonie. Les mesures de l'or en suspension ont été faites au LPS (Saclay) par D. ROUSSEAU. Les mesures ETA-LEAFS ont bénéficié de l'aide de B. REMY et P. MAUCHIEN (CEA). Les mesures de matière organique nous ont été communiquées par J. DAGAUD (LPCM, UMPC). Cette recherche a bénéficié de l'aide financière des programmes DBT, PIRAT ET PEGI. Nous avons bénéficié de la lecture critique de F. COLIN. Madame LETEMPLIER (LGM) a assuré l'édition de cet article.

## ANNEXE 1

**Les problèmes d'échantillonnage :**

Cette annexe se décompose en deux parties, l'une consacrée à la représentativité des échantillons dans de vastes environnements et la seconde à la limite entre la matière dissoute et la matière particulaire.

**1. Représentativité des échantillons ponctuels :**

Chaque échantillon a une histoire qui lui est propre et dont les différents épisodes lui ont conféré une composition particulière en matière dissoute et particulaire. Les matériaux qui le composent ont des origines multiples : l'atmosphère, la lithosphère, la pédosphère, la biosphère ... et donc des variations de comportements tant dans le temps que dans l'espace liés à des causes diverses et associées.

**1.1. Variabilités temporelles :**

La variabilité de la composition chimique d'une eau en fonction du temps peut être généralement attribuable à des variations des débits au point considéré ou à des variations saisonnières de la production phytoplantonique. Ainsi afin d'observer la représentativité d'un échantillon, il faut généralement le situer par rapport aux épisodes hydrologiques du fleuve et aux cycles de la végétation.

Les crues par exemple peuvent occasionner des modifications de la composition des eaux, conséquences des précipitations, du lessivage des sols, du transport de particules solides lors du ruissellement, de la remise en suspension de matériaux situés dans le lit de la rivière... Ainsi en forte crue, les eaux de rivières correspondent au mélange des eaux de pluies et des eaux de ruissellement et se distinguent généralement nettement des eaux de source ou de nappe.

Les variations saisonnières des concentrations en éléments majeurs ont été étudiées dans l'Amazonie (GIBBS, 1972) et dans le Congo. Dans l'Amazonie, des analyses de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et de la salinité montrent une variation significative de leurs concentrations avec le débit. Des minima sont observés approximativement deux mois après le débit maximum du fleuve. Cependant des modèles de dilution simple par les eaux de pluies de ces éléments n'ont pas donné de résultats satisfaisants. D'autres processus biologiques ou physico-chimiques sont à prendre en compte. Au contraire  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Mg}^{2+}$  ne présentent aucune variation en fonction du débit et le potassium a une concentration qui décroît à l'étiage. Dans le Congo, la concentration de la plupart des éléments évolue inversement au débit alors que  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$  ont un comportement indépendant du débit,  $\text{Ca}^{2+}$  présente un maximum un mois avant l'étiage et  $\text{K}^+$  un mois après l'étiage. Comme pour l'Amazonie, les variations saisonnières des concentrations ne peuvent s'expliquer par un simple processus de dilution des eaux du fleuve par les eaux de pluies.

Cependant les compositions chimiques des rivières et a fortiori des fleuves ne dépendent pas uniquement des différents épisodes hydrologiques mais peuvent également évoluer en fonction de la profondeur et de la largeur du fleuve, comme nous l'avons indiqué dans le paragraphe suivant.

**1.2. Variabilités spatiales**

Les variations spatiales des compositions chimiques des fleuves peuvent être provoquées par une distribution non homogène des constituants, dont nous donnerons quelques exemples, ainsi que par des hétérogénéités des masses d'eau au sein du fleuve.

**1.2.1. Distribution non homogène des constituants**

La distribution non homogène des constituants d'une rivière est souvent observée à l'approche des rives. En effet des phénomènes de turbulence du fleuve créés par des obstacles naturels ou artificiels génèrent des hétérogénéités dans la composition chimique de l'eau.

La profondeur est également un paramètre influençant l'homogénéité d'une eau de rivière. En particulier les matériaux non dissous ont généralement une distribution hétérogène sur une colonne d'eau en raison de leur densité. Leur concentration a tendance à augmenter avec la profondeur et les particules à se déposer sous l'effet de la gravité (comme le montrent par exemple TRIMONIS et al. (1967)). Ceci est illustré par les données obtenues à la confluence du Rio Negro et du Solimoes (Tableau 5). D'autres matériaux de densité plus faible que l'eau comme certains détritiques biologiques ou des huiles ont au contraire tendance à être en quantité supérieure

à la surface. D'autres phénomènes que la densité peuvent perturber l'homogénéité spatiale de la composition des eaux comme par exemple la croissance des algues qui peut entraîner en surface une diminution de leurs substances nutritives et une augmentation de l'alcalinité par leur respiration.

**Tableau n° 5**

Concentrations en mg/l de la matière en suspension à la confluence du Rio Negro et du Solimoes en fonction de la profondeur du prélèvement. Les numéros indiquent le prélèvement effectué sur une radiale.

Profondeur	0 m	10 m	17 m	25 m	33 m	40 m
1	98,6	124,9				
2	135,9					154,5
3	74,3			127,2		
4	17,1				130,5	
5	158,7					
6	709					
7	97,3		153,8			

### 1.2.2. Hétérogénéité des masses d'eau

La variabilité spatiale de la composition d'une eau peut être également engendrée par des hétérogénéités de masses d'eau dues par exemple à un mélange incomplet de celles-ci. Ce phénomène peut être même visible dans des cas extrêmes comme celui du Rio Negro, dont les eaux noires se distinguent à l'oeil du cours principal de l'Amazone pendant plusieurs kilomètres, ou dans le cas du Congo à la confluence de l'Oubangui. Comme précédemment, ces hétérogénéités peuvent varier en fonction du temps suivant le débit, la température et les apports extérieurs.

Ainsi le choix d'un échantillon représentatif implique une bonne connaissance des données hydrologiques du fleuve considéré. Cependant l'étude des fleuves comme l'Amazone et le Congo ne peut tenir compte de tous les particularismes en raison de l'ampleur des bassins qu'ils drainent et de l'inaccessibilité de certaines données ou échantillons. Il nous importe donc de choisir au mieux les points de prélèvement en n'hésitant pas à les dupliquer lors de campagnes successives.

## 2. Limite entre particulaire et dissous

A la difficulté de choisir des échantillons représentatifs s'ajoute le problème de la discrimination entre la matière en solution et celle sous forme particulaire. Habituellement la distinction s'établit par filtration à 0,45  $\mu\text{m}$ . Cependant cette limite arbitraire ne correspond qu'à une convention de manipulation et non à une réalité physique. Elle ne peut assurer que la matière colloïdale inorganique, organique ou microbiologique soit éliminée. Ainsi pour l'aluminium, les filtres de 0,45  $\mu\text{m}$  ne retiennent pas l'illite et la kaolinite dont les dimensions varient de 0,2 à 0,08  $\mu\text{m}$  et les montmorillonites qui sont inférieures à 0,08  $\mu\text{m}$  (DUCHAUFFOUR, 1970). De même pour le fer, une étude sur l'estuaire du Congo (FIGUERES et al., 1978) a montré que la concentration en fer dissous diminuait avec la taille des pores du filtre, celle-ci variant de 5 à 0,025  $\mu\text{m}$ . Une étude sur le fer dans les rivières françaises (FIGUERES, 1978) montrait que seules des ultrafiltrations avec des membranes dont la taille des pores est inférieure à 50 Angström permettait d'obtenir des concentrations constantes de fer, mais soulignait la mauvaise reproductibilité des résultats. Celle-ci peut s'expliquer par le fait que les techniques de filtration et d'ultrafiltration sont sujettes à des problèmes d'obstruction progressive de la membrane ou du filtre. Le colmatage des filtres par les particules en suspension réduit la porosité effective de ces filtres et accroît l'adsorption des particules de taille inférieure à la dimension moyenne des pores, ce qui correspond à une source d'erreur. Ainsi en dehors des éléments majeurs,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , qui sont sans doute principalement sous forme dissoute, il est difficile de distinguer la phase dissoute de la phase particulaire. Il importerait pour chaque élément de procéder à des filtrations successives afin d'apprécier la limite entre ces deux phases qui lui est propre et qui dépend de l'environnement dans lequel l'élément évolue.

## ANNEXE 2 :

### Prélèvements effectués sur l'Amazone en juin 1989 pour l'analyse de l'or

Cet échantillonnage a été effectué par B. DUPRE et F. SYMBILLE du 18 au 22 juin 1989 sur l'Amazone entre Manaus et Santarem. Nous allons indiquer dans cette annexe les points de prélèvements ainsi que les renseignements obtenus à partir du carnet de bord de B. DUPRE. Tous les échantillons cités correspondent à un prélèvement spécifique pour l'or. Parallèlement une seconde série d'échantillons a été prélevée pour l'étude des éléments majeurs et des isotopes. Les prélèvements sont effectués loin des berges, sauf conditions exceptionnelles, alors notées pour chaque échantillon.

#### Échantillon n° 1 :

L'échantillon n° 1 a été prélevé le 18/06 sur le Rio Negro avant les îles situées à la confluence du Solimoes et du Rio Negro. Il est à noter que la solution et le filtre n'ont pas été prélevés simultanément mais au même endroit. Le filtre a été recueilli après le passage de 2 l d'eau.

#### Échantillon n° 2 :

L'échantillon n° 2 a été prélevé le même jour à 18 h sur le premier affluent rive gauche du Rio Negro à partir de la confluence. Cet affluent a été qualifié de lac par B. DUPRE. Le filtre recueilli correspond à 1 l d'eau.

#### Échantillon n° 3 :

L'échantillon n° 3 a été prélevé le lundi 19 à 2 h dans le lac Januaca situé à l'intérieur d'un marais après 40 minutes de navigation à partir du Rio Solimoes.

#### Échantillon n° 4 :

L'échantillon n° 4 a été prélevé au milieu du Solimoes à la station de prélèvement située en amont de Manaus.

#### Échantillon n° 5 :

L'échantillon n° 5 a été prélevé sur l'Amazone entre deux îles situées entre Manaus et le Rio Madeira.

#### Échantillon n° 6 :

L'échantillon n° 6 a été prélevé à 18 h, au milieu de l'Amazone, juste avant sa confluence avec le Rio Madeira et à la hauteur de Amajari.

#### Échantillon n° 7 :

L'échantillon n° 7 a été prélevé à 22 h sur le Rio Madeira en aval de Nova Olinda do Norte. Il est à noter que ce prélèvement a été effectué relativement proche de la rive droite de l'affluent.

#### Échantillon n° 8 :

L'échantillon n° 8 a été prélevé le 20 juin à 1 h 15 au milieu de l'Amazone après le Rio Madeira et avant le village d'Itacoatiara.

#### Échantillon n° 9 :

L'échantillon n° 9 a été prélevé à 6 h 30 près de Tobocal sur l'Amazone.

#### Échantillon n° 10 :

L'échantillon n° 10 a été prélevé à 13 h 30 sur un affluent de la rive gauche de l'Amazone près d'un long parana. Au regard de l'ampleur de la zone inondée présente en cette période de crue, on peut considérer que cet échantillon correspond à une masse d'eau provenant directement de l'Amazone.

#### Échantillon n° 11 :

L'échantillon n° 11 a été prélevé à 16 h 30 sur l'Amazone après le grand parana cité précédemment et en amont de la confluence avec l'affluent prélevé en tant qu'échantillon n° 10.

**Échantillon n° 12 :**

L'échantillon n° 12 a été prélevé à 19 h en aval des deux îles situées après Urucutitora et en amont du village de Parintins. Il correspond à de mauvaises conditions d'échantillonnage : l'Amazone était agité par un fort vent et le prélèvement a été réalisé très proche de la rive.

**Échantillon n° 13 :**

L'échantillon n° 13 a été prélevé sur l'Amazone (1/4 gauche à la proue) à la hauteur de Santa Julia, entre les îles de Parintins et de Caldeira.

**Échantillon n° 14 :**

L'échantillon n° 14 a été prélevé dans un marais près du Rio Tniamunda. Ce marais n'était pas stagnant.

**Échantillon n° 16 :**

L'échantillon n° 16 correspond au prélèvement du Rio Trombetas.

**Échantillon n° 17 :**

L'échantillon n° 17 a été prélevé sur l'Amazone en aval d'Obidos au niveau des îles Domeio.

**Échantillon n° 18 :**

L'échantillon n° 18 a été prélevé juste en amont de la confluence de l'Amazone et du Rio Tapajos, en face du phare de Tapara et au niveau des îles de Manecas.

**Échantillon n° 19 :**

L'échantillon n° 19 a été prélevé sur le Rio Tapajos.

**Échantillon n° 20 :**

L'échantillon n° 20 a été prélevé près de la berge à 10 kms en aval de Santarem.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- BENEDETTI M. and BOULEGUE J. (1990). Transfer and deposition of gold in Congo Watershed. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 100, 108-117.
- BENES P. et SMETANA J. (1966). A radiotracer study of gold adsorption on polyethylene from very dilute aqueous solutions. *Radiochimica Acta*, 6, 196-201.
- BROECKER W.S. et PENG T.H. (1982). *Tracers in the Sea*. Eldigio Press. New York.
- DUCHAUFFOUR Ph. (1970). *Précis de pédologie*. Masson. Paris.
- ERTEL J.R., HEDGES J.I., DEVOL A.H. et RICHEY J.E. (1986). Dissolved humic substances of the Amazon river system. *Limnol. Oceanogr.*, 31(4), 739-754.
- FALKNER K.K. (1989). An investigation of the marine geochemistry of gold. PhD. M.I.T.
- FERREIRA J.R., DEVOL A.H., MARTINELLI L.A., FORSBERG B.R., VICTORIA R.L., RICHEY J.E. et MORTATTI J. (1988). Chemical composition of the Madeira river : seasonal trends and total transport. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, 66, 63-75.
- FIGUERES G. (1978). Contribution à l'étude géochimique du fer et du manganèse dans les eaux de surface (rivières, lacs, estuaires). Thèse. Université de Paris.
- FIGUERES G., MARTIN J.M. AND MEYBECK M. (1978). Iron behaviour in the Zaire estuary. *Netherlands Journal of Sea Research*, 12, 329-337.
- FURCH K. (1987). Amazonian rivers : their chemistry and transport of dissolved solids through their basins. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, 64, 311-323.
- GIBBS R.J. (1967). The geochemistry of Amazon river system. I. Factors that control the salinity and the composition and concentration of suspended solids. *Geol. Amer. Bull.*, 78, 1203-1232.
- GIBBS R.J. (1972). Water chemistry of the Amazon River. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 36, 1061-1066.

- GORDEEV V.V., MIKLISHANSKY A.Z., MIGDISOV A.A. et ARTEMYEV V.E. (1985). Rare element distribution in the surface suspended material of the Amazon river, some of the tributaries and estuary. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg*, 58, 225-243.
- HAMILTON T.W., ELLIS J., FLORENCE T.M. et FARDY J.J. (1983). Analysis of gold in surface water from Australian goldfields : an investigation into direct hydrogeochemical prospecting for gold. *Econ. Geol.* 78, 1335-1341.
- HOLLAND H.D. (1978). *The chemistry of the Atmosphere and Oceans*. John Wiley and Sons, New York, pp. 351.
- MARTINELLI L.A., FERREIRA J.R., FORSBERG B.R. et VICTORIA R.L. (1988). Mercury contamination in the Amazon : a gold rush consequence. *Ambio*, 17, 252-254.
- MOLINIER M. GUYOT J.L., de OLIVEIRA E., GUIMARÃES V. et CHAVES A. (1994). Hydrogéologie du bassin de l'Amazone. In "Grands Bassins Fluviaux Tropicaux Periatlantiques", ORSTOM, Paris (ce livre).
- McHUGH (1988). Concentration of gold in natural waters. *J. of Geochemical Exploration*, 30, 1-7.
- NKOUNKOU R.R. (1989). Hydrogéodynamique actuelle du Congo et de l'Amazone. Cycle global de l'eau et bilan de l'érosion au cours des temps phanérozoïques. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- NORDIN C.F. and MEADE R.H. (1986). The Amazon and the Orinoco. In "McGraw Hill Yearbook of Science and Technology 1986", p. 385-390.
- PAOLINI J. (1979). Huminstoffsystem in der Caatiinga Amazonica bei San Carlos de Rio Negro. *Amazoniana*, 6, 569-582.
- REMY B., VERHAEGHE I. et MAUCHIEN P. (1991). Real sample analysis by ETA-LEAFS with background correction : application to gold determination in river water. *Applied Spectros.*, 44, 19-24.
- RICHEY J.E., VICTORIA R.L. and FORSBERG B.R. (1990). The biogeochemistry of a major river system : the Amazon case study. in *Biogeochemistry of Major World Rivers*. John Wiley and Sons.
- SALATI E. et MARQUES J. (1984) Climatology of the Amazon Region. in "The Amazon" (Sioli H. ed.) W. Junk Publ. 85-125.
- SIOLI H. (1984). The Amazon and its main affluents : hydrography, morphology of the river course, and rivers types. in "The Amazon" (Sioli H. ed.), W. Junk Publ., 127-166.
- TRIMONIS E.S., STRYUK V.L. and GORDEYEV V.V. (1987). Distribution of suspended matter in the Amazon and adjoining areas of the atlantic Ocean. *Oceanology*, 27, 735-739.