

**Mission ORSTOM  
La Paz, Bolivia**

**TOTAL OIL & GAS EXPLORATION  
La Paz, Bolivia**

**PRESTATIONS EN HYDROGEOCHIMIE DES EAUX  
EVALUATION DE L'IMPACT DU FORAGE YARIAPO  
SUR LA QUALITE DES EAUX**

**Bassin du rio Béni (Bolivie)**

**Laurence MAURICE BOURGOIN**

**HYDROCONSULT INTERNATIONAL  
GIE ORSTOM - EDF**

**Février 1996**

**IMPACT DU FORAGE VARIABO**

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RAPPEL DE L'ETUDE DE L'ETAT ZERO ET OBJECTIF</b> .....                 | <b>4</b>  |
| <b>1 - RECUEIL DES DONNEES</b> .....                                      | <b>5</b>  |
| 1.1 PRESENTATION DE LA SECONDE CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS .....             | 5         |
| 1.2 MATERIEL ET METHODES .....  | 5         |
| <b>2 - LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES</b> .....                         | <b>8</b>  |
| 2.1 LA TEMPERATURE .....  | 8         |
| 2.2 LE PH .....   | 8         |
| 2.3 LA CONDUCTIVITE .....   | 8         |
| 2.4 LES MATIERES EN SUSPENSION .....                                      | 9         |
| 2.5 LA MATIERE ORGANIQUE PARTICULAIRE.....                                | 9         |
| 2.6 L'OXYGENE DISSOUS.....  | 9         |
| <b>3 - LES CATIONS ET LES ANIONS MAJEURS</b> .....                        | <b>10</b> |
| 3.1 LE CALCIUM .....  | 11        |
| 3.2 LE MAGNESIUM.....   | 11        |
| 3.3 LE POTASSIUM .....  | 11        |
| 3.4 LE SODIUM .....   | 11        |
| 3.5 LES BICARBONATES .....  | 11        |
| 3.6 LES CHLORURES.....  | 11        |
| 3.7 LES NITRATES.....   | 12        |
| 3.8 LES SULFATES.....   | 12        |
| 3.9 LA SILICE .....   | 12        |
| <b>4 - LES GERMES PATHOGENES</b> .....                                    | <b>15</b> |
| 4.1 ANALYSE MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU DU ROBINET DU CAMP.....              | 15        |
| 4.2 ANALYSE MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU DE POMPAGE EN SORTIE DU PUTTS .....  | 15        |
| 4.3 ANALYSE MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU DE SORTIE DE LA FOSSE SEPTIQUE ..... | 15        |
| <b>5 - LES ELEMENTS METALLIQUES</b> .....                                 | <b>16</b> |
| 5.1 L'ARSENIC .....   | 18        |
| 5.2 LE BARYUM .....   | 18        |
| 5.3 LE BORE .....   | 18        |
| 5.4 LE CADMIUM .....  | 18        |
| 5.5 LE CUIVRE .....   | 19        |
| 5.6 LE CHROME .....   | 19        |
| 5.7 LE PLOMB.....   | 19        |
| 5.8 LE SELENIUM.....  | 19        |
| 5.9 LE ZINC.....  | 20        |
| 5.10 LE FER.....  | 20        |
| 5.11 LE MERCURE.....  | 20        |
| <b>RESUME - CONCLUSION</b> .....  | <b>22</b> |



# 1 - RECUEIL DES DONNEES

## 1.1 Présentation de la seconde campagne de prélèvements

La seconde campagne de prélèvement a été réalisée du 18 au 20 décembre 1995, soit deux mois après le début des opérations de forage. Le 18 décembre 1995, la profondeur du puits d'exploration était de 3000 m, l'avancée se trouvant progressivement ralentie par la compaction des roches traversées.

Nous avons profité de la logistique mise en place par TOTAL pour réaliser dans la même journée les prélèvements d'eau de l'Arana, en amont du rejet des boues de forage (T1), dans ces boues (T2) ainsi que dans les eaux du campement, notamment afin de vérifier la potabilité de l'eau du robinet. L'eau utilisée pour la consommation courante est prélevée de l'Arana puis ensuite traitée par une mini station (équipée de filtres à charbon actif, sans traitement aux U.V.). Ainsi, nous avons prélevé :

- ✓ directement à la sortie de la pompe dont la crépine est installée dans les eaux de l'Arana (T3),
- ✓ dans les eaux correspondant au rejet de la fosse septique (T4) et
- ✓ l'eau du robinet de la cuisine du campement (T5).

Les accès en hélicoptère nous ont permis de rentrer en fin de journée à Rurrenabaque pour procéder aux filtrations et à la préservation des échantillons.

Le lendemain, les prélèvements T6 et T7 ont été réalisés dans le rio Tuichi, en amont et en aval de la confluence avec l'Arana, à peu près à égale distance. Les 2 derniers prélèvements ont été réalisés dans le rio Béni, en amont et en aval de la confluence avec le Tuichi ; nous avons réalisé le point aval, T9, à Angosto del Bala, station hydrologique suivie par le SENAMHI et l'Orstom depuis 1967. Les points de prélèvements relevés à l'extérieur du campement sont présentés en figure 1.1.

Le débit estimé à partir de la hauteur d'eau relevée à Angosto del Bala est d'environ  $1\ 500\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$ , soit légèrement supérieur à celui observé en mai 1995, au cours de la précédente campagne. Cependant, cette augmentation de débit n'a pas été observée sur l'Arana où, au contraire, le niveau des eaux et la largeur de la rivière étaient inférieurs à ceux de mai.

Ces prélèvements ont été réalisés en début de saison des pluies, ce qui peut entraîner une légère contamination des eaux superficielles due au premier lessivage des sols.

Les éléments physico-chimiques et chimiques mesurés sur les échantillons d'eau sont les mêmes que pour la précédente campagne :

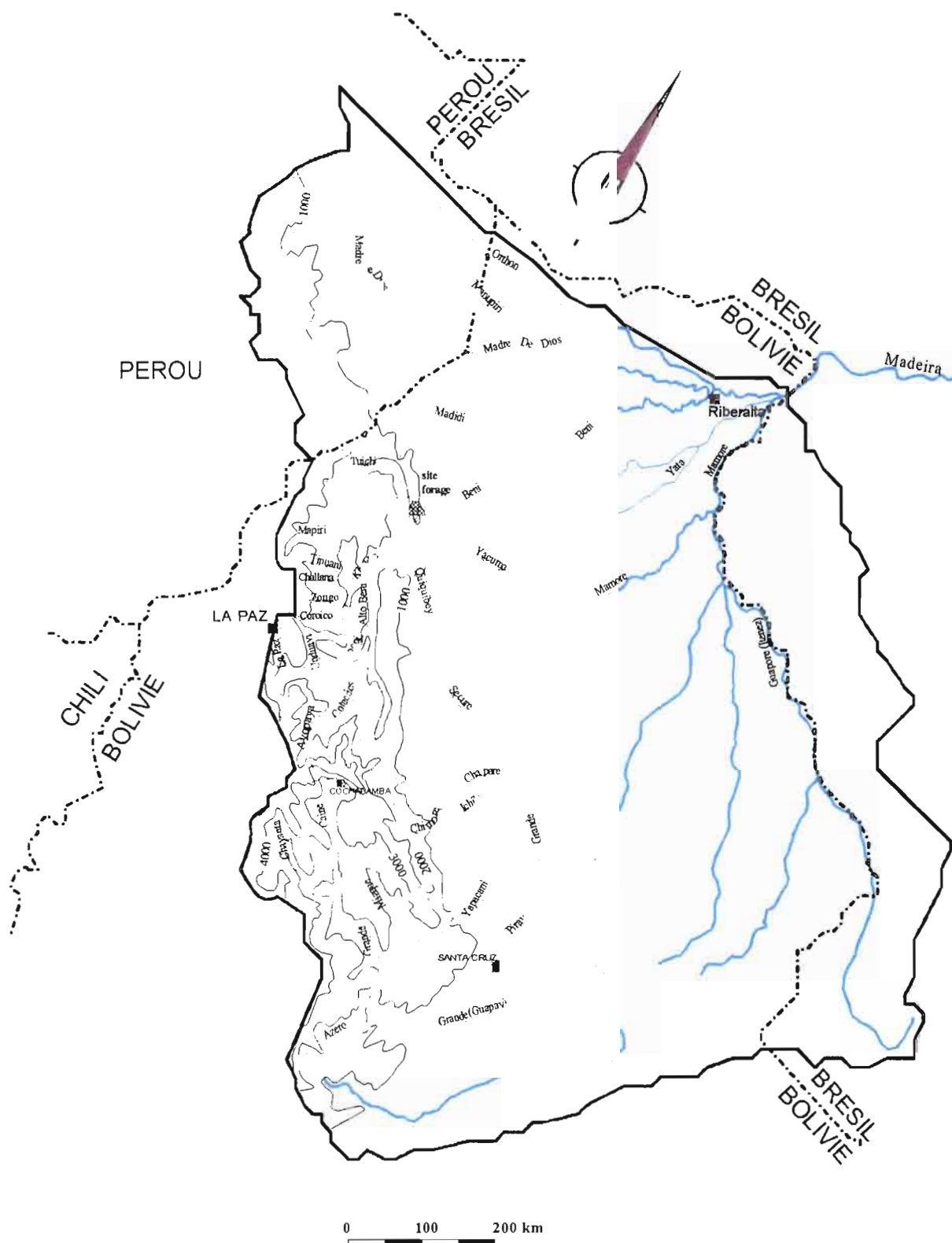
- **Paramètres physico-chimiques** : température, pH, conductivité, matières en suspension et contenu en matière organique.
- **Sels majeurs et éléments nutritifs** : calcium, magnésium, potassium, sodium, silice, chlorures, bicarbonates, nitrates, sulfates, et phosphates.
- **Éléments métalliques** : arsenic (As), baryum (Ba), bore (B), cadmium (Cd), cuivre (Cu), plomb (Pb), zinc (Zn), étain (Sn), fer (Fe), et mercure (Hg).

## 1.2 Matériel et méthodes

Les mêmes techniques de prélèvement "ultra-propres", de filtration et de conservation des échantillons ont été utilisées pour les deux campagnes. Les prélèvements d'eau de rivière ont été réalisés à l'aide de bouteilles Téflon, préalablement nettoyées à l'acide nitrique, et conservées dans des sacs en polyéthylène hermétiquement fermés.

Les filtrations ont été réalisées sous hotte à flux laminaire portable. Les eaux filtrées ont été stockées dans des flacons de Téflon fermés hermétiquement et enveloppés dans un sac de polyéthylène ; pour permettre leur conservation, les filtrats destinés à l'analyse du mercure ont été acidifiés. Les filtres ont été conservés dans les boîtes de Pétri protégées d'un sac de polyéthylène. Selon cette procédure, les échantillons peuvent être conservés 6 mois.

Figure 1.1. Localisation des points de prélèvements de la campagne de mesures réalisée du 18 au 20 décembre 1995.



THE UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS

## 2 - LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

L'ensemble des résultats des paramètres physico-chimiques obtenus au cours de la seconde campagne de prélèvement sont présentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Résultats des paramètres physico-chimiques mesurés dans les rios Arana, Tuichi et Béni, ainsi que dans les eaux du campement, entre le 18 et 21 décembre 1995.

| N°             | Rio                        | Station         | Position GPS                        | Date heure        | Temp (°C) | pH   | Cond. (µS/cm) | MES (mg/l) | m.o. (% MES) |
|----------------|----------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|------|---------------|------------|--------------|
| T <sub>1</sub> | Arana amont face campement | Campement TOTAL | S 14° 27' 43"<br>W 67° 46' 45"      | 18/12/95<br>11H00 | 30,2      | 7,85 | 339           | 110        | 4,20         |
| T <sub>2</sub> | rio rejet boues de forage  | Campement TOTAL | S 14° 28' 12"<br>W 67° 46' 46"      | 18/12/95<br>11H30 | 29,0      | 8,80 | 806           | 26 960     | 7,50         |
| T <sub>3</sub> | Eau pompage sortie puits   | Campement TOTAL | S 14° 28' 12"<br>W 67° 46' 46"      | 18/12/95<br>14H00 | -         | 6,54 | 512           | -          |              |
| T <sub>4</sub> | Eau rejet fosse septique   | Campement TOTAL | S 14° 28' 12"<br>W 67° 46' 46"      | 18/12/95<br>14H30 | -         | 7,41 | 402           | -          |              |
| T <sub>5</sub> | Eau robinet cuisine        | Campement TOTAL | S 14° 28' 12"<br>W 67° 46' 46"      | 18/12/95<br>15H00 | -         | 7,25 | 382           | -          |              |
| T <sub>6</sub> | Tuichi amont confl. Arana  | Rurrenabaque    | S 14° 29' 49.5"<br>W 67° 48' 59.3"  | 19/05/95<br>11H30 | 27,5      | 7,20 | 68            | 818        | 3,65         |
| T <sub>7</sub> | Tuichi aval confl. Arana   | Rurrenabaque    | S 14° 32' 07.1"<br>W 67° 45' 10.3 " | 19/05/95<br>12H10 | 28,0      | 7,13 | 69            | 695        | 4,90         |
| T <sub>8</sub> | Béni amont confl. Tuichi   | Rurrenabaque    | S 14° 35' 24.0"<br>W 65° 31' 57.9"  | 19/05/95<br>15H10 | 28,8      | 7,13 | 99            | 930        | 5,13         |
| T <sub>9</sub> | Béni aval confl. Tuichi    | Rurrenabaque    | S 14° 31' 37.1"<br>W 67° 29' 50.1"  | 19/05/95<br>15H45 | 29,1      | 7,07 | 83            | 779        | 4,44         |

### 2.1 La température

La température des eaux échantillonnées varie entre 27 et 30°C, ce qui est relativement élevé. La température est particulièrement liée à la saison, à l'heure du prélèvement et au type de rivière. Les prélèvements ont été effectués en fin de saison sèche, c'est-à-dire à une période où les profondeurs d'eau sont minimales ; c'est la raison pour laquelle les températures sont plus élevées qu'en mai, au cours de la première campagne.

### 2.2 Le pH

Le pH a été mesuré de retour au laboratoire, dans un bêcher pour éviter tout processus de diffusion sur les électrodes. Les valeurs mesurées sur les échantillons d'eaux de rivière sont proches et légèrement alcalines, puisqu'elles oscillent entre 7,1 et 7,8. Les pH les plus alcalins ont été mesurés dans l'Arana et dans les boues où cette valeur est à rapprocher du maximum de conductivité observé. Dans l'eau du robinet prélevée sur le camp, le pH est de 7,25, valeur tout-à-fait courante pour une eau de consommation.

### 2.3 La conductivité

Les conductivités mesurées dans les rivières échantillonnées sont moins élevées que celles observées en mai, puisqu'elles varient de 68 µS cm<sup>-1</sup> dans le rio Tuichi à 91 ± 8 µS cm<sup>-1</sup> dans le Béni pour atteindre 339 µS cm<sup>-1</sup> dans l'Arana (figure 2.1). La valeur maximale de conductivité est mesurée dans les boues de forage ; l'analyse des sels majeurs nous permettra d'expliquer ce maximum. En ce qui concerne l'eau du robinet du campement, la valeur de conductivité de 382 µS cm<sup>-1</sup> est indicatrice d'une minéralisation moyenne des eaux ; elle est également égale à la valeur recommandée par la directive des Communautés Européennes (400 µS cm<sup>-1</sup>).



## 2.4 Les matières en suspension

Les matières en suspension (MES) mesurées cette campagne-ci sur l'Arana sont de 110 mg l<sup>-1</sup>, soit 9 fois plus faibles que celles qui avaient été obtenues en mai. Cette eau nécessite cependant une décantation puisque la valeur de potabilité fixée par le Ministère de l'Environnement français est de 25 mg l<sup>-1</sup> pour une eau de bonne qualité, c'est-à-dire une «eau permettant la production d'eau potable par des traitements simples ». En revanche, dans les eaux de surface des rios Béni et Tuichi, les teneurs en MES sont comprises entre 700 et 900 mg l<sup>-1</sup> ; ces fortes valeurs peuvent s'expliquer par l'épisode hydrologique puisque les prélèvements ont été réalisés en début de saison des pluies.

Afin d'estimer l'impact des rejets de boues de forage sur la charge particulaire des eaux du Tuichi, il suffit de comparer les MES estimées de part et d'autre de sa confluence avec l'Arana. Les valeurs obtenues nous montrent plutôt un effet de dilution, puisque les valeurs passent de 800 à 700 mg l<sup>-1</sup>, entre l'amont et l'aval de la confluence, ce qui tend à prouver que, **le jour du prélèvement, les rejets de boues n'influaient pas sur la charge turbide du Tuichi, et a fortiori, du Béni**. Ceci peut s'expliquer par le fait que le ruisseau recueillant les boues de forage ne présentait pas, en cette période, un débit suffisant pour alimenter l'Arana. En effet, la charge turbide de ce ruisseau mesurée le 18 décembre 1995 était de 27 g l<sup>-1</sup>, ce qui est particulièrement élevé ; les boues rejetées dans ce ruisseau n'étaient pour ainsi dire pas encore diluées avec les eaux naturelles apportées par le ruissellement.

## 2.5 La matière organique particulaire

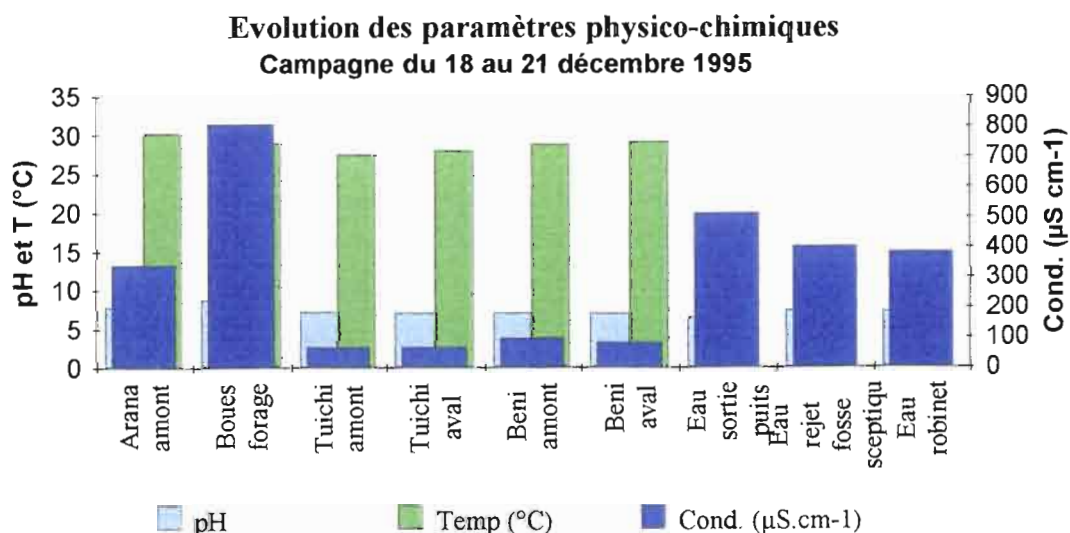
La fraction organique du matériel en suspension contenu dans les eaux de rivière échantillonnées est en moyenne de 4,6 ± 1 % MES, ce qui est tout-à-fait classique puisque dans ce type de rivière, les valeurs moyennes de contenu en matériel organique oscillent autour de 5 % MES.

Seules dans les boues de forage, la fraction organique particulaire est plus importante ; elle atteint 7,5 % MES. Mais ce pourcentage est insuffisant pour une boue d'épandage.

## 2.6 L'oxygène dissous

Les teneurs en oxygène dissous ont pu être déterminées dans les eaux de surface des rivières Arana et Béni. Les concentrations sont respectivement de 11,2 et 7,1 mg l<sup>-1</sup>, ce qui est largement suffisant pour une eau naturelle. Ces eaux ne sont donc pas en conditions hypoxiques malgré les faibles profondeurs et les températures de surface élevées. Le régime hydrodynamique permet donc une bonne oxygénation des eaux de surface.

Figure 2.1. Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux des rivières Arana, Tuichi et Béni, ainsi que dans les eaux du camp, du 18 au 21 décembre 1995.







Dans les eaux du Tuichi, les chlorures sont quasi-absents de la charge anionique ; dans les eaux du Béni, les teneurs sont de 1 mg l<sup>-1</sup> et dans l'Arana, de 2 mg l<sup>-1</sup>. On peut observer qu'il n'y a quasiment aucune différence dans les teneurs en chlorures des eaux de surface, entre les deux campagnes. L'eau du robinet contient très peu de chlorures dont la teneur est cinq fois inférieure à la valeur guide proposée pour la consommation humaine par la directive CE.

### **3.7 Les nitrates**

En décembre 1995, seules les eaux de l'Arana présentent une teneur en nitrates non négligeable, de 7,6 mg l<sup>-1</sup>. Le mode de culture dans cette zone particulièrement fertile ne nécessite pas l'utilisation d'engrais. La valeur mesurée dans l'Arana peut être imputable au camp basé sur sa rive droite.

Quant à la teneur en nitrates mesurée dans l'eau du robinet, elle est 5 fois inférieure à la valeur guide proposée pour les eaux de consommation humaine par la directive CE, de 25 mg l<sup>-1</sup>, ce qui n'entraînera donc aucune incidence néfaste sur la santé des personnes vivant sur le camp.

### **3.8 Les sulfates**

Dans les eaux du Tuichi et du Béni, les concentrations en sulfates mesurées en mai et en décembre 95 sont identiques (en tenant compte de l'erreur de mesure). C'est sur le Tuichi que les plus faibles concentrations ont été mesurées, 10 mg l<sup>-1</sup>, contre 21 mg l<sup>-1</sup> sur le Béni et 42 mg l<sup>-1</sup> sur l'Arana. Cette dernière valeur est bien plus élevée que la moyenne interannuelle mesurée entre 1983 et 1991 sur le Béni, à Angosto del Bala, de 12,3 mg l<sup>-1</sup> (Guyot, 1993). Ces sulfates peuvent provenir de l'oxydation des sulfures métalliques contenus dans les sols.

La forte teneur en sulfates mesurée dans l'eau du robinet est due à la richesse en sulfates de l'eau de l'Arana. Cette teneur de 35 mg l<sup>-1</sup> est supérieure à la valeur guide proposée par la directive CE, de 25 mg l<sup>-1</sup> mais reste largement inférieure à la concentration maximale admissible, de 250 mg l<sup>-1</sup>.

### **3.9 La silice**

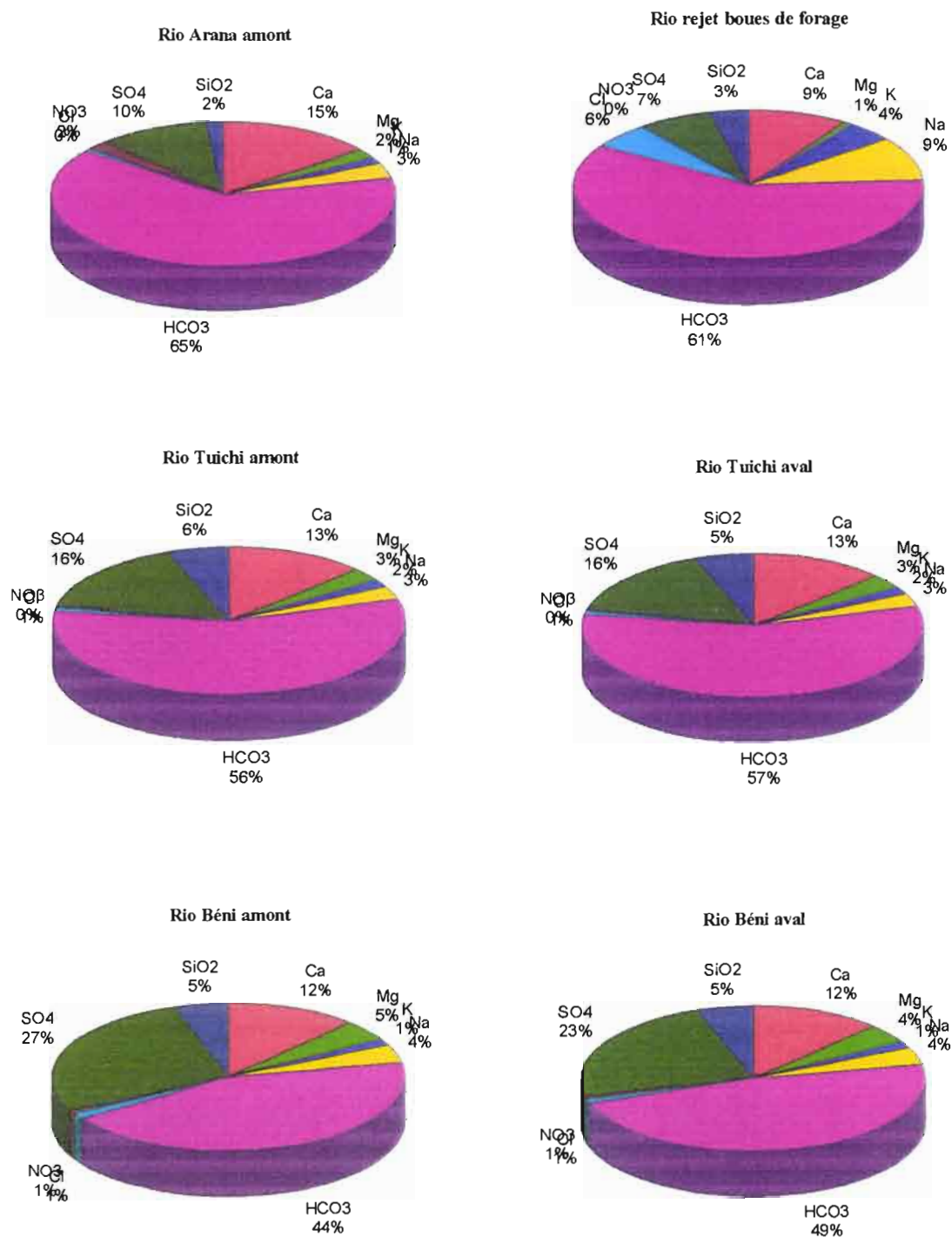
Dans les rivières échantillonnées, les concentrations en silice sont deux fois plus faibles en décembre qu'en mai. Elles varient de 3,5 à 4,0 mg l<sup>-1</sup> dans le Tuichi et le Béni et atteignent 6 mg l<sup>-1</sup> dans l'Arana. Les boues de forage n'en contiennent pratiquement pas, 1 mg l<sup>-1</sup>. La silice ne représente que 2 à 5 % de la fraction dissoute dans les eaux de surface (figure 3.1), et 1,5 % dans les eaux prélevées sur le camp, ce, en raison de leur forte minéralisation en anions et en bicarbonates.

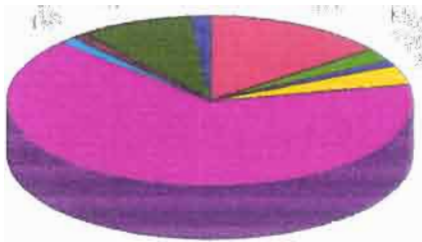
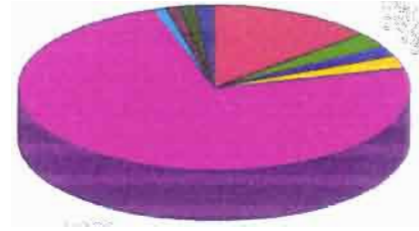
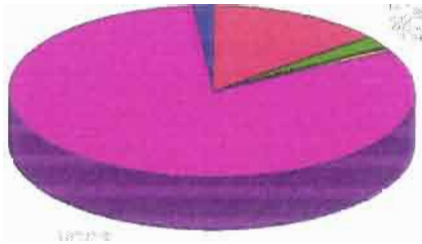
**En conclusion**, les rejets de boues de forage n'ont pas d'influence sur la minéralisation des eaux du Tuichi et de l'Arana, qui présentent des concentrations en anions et cations majeurs tout-à-fait semblables à celles obtenues en mai 1995. Ceci peut s'expliquer d'une part, par le fait que les jours précédant le prélèvement, il n'y avait pas de communication directe de la rivière où sont déversées les boues, avec l'Arana et d'autre part, par le fait que les boues de forage sont très faiblement minéralisées.

L'eau du robinet, le jour du prélèvement, présente une minéralisation légèrement trop faible comparativement aux valeurs guides de potabilité préconisées par la Directive des Communautés Européennes avec, en revanche, des teneurs en sulfates trop élevées. Cette eau apparaît donc trop faiblement minéralisée pour sa consommation directe alors qu'elle peut être utilisée pour la cuisine. Nous confirmons notre recommandation qui est de consommer directement de l'eau minérale.

Il est intéressant de remarquer que le faciès géochimique de l'eau du robinet est semblable à celui des eaux de l'Arana.

Figure 3.1. Répartition des ions majeurs analysés dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni ainsi que dans les eaux du cément (en pourcentage de la charge pondérale minérale dissoute), du 19 au 21 décembre 1995.







## 5 - LES ELEMENTS METALLIQUES

Les éléments métalliques retenus dans notre étude sur la contamination éventuelles des eaux autour du site de forage sont les même à chaque campagne, à savoir : arsenic (As), baryum (Ba), bore (Bo), cadmium (Cd), cuivre (Cu), chrome (Cr), plomb (Pb), sélénium (Se), zinc (Zn), fer (Fe), et mercure (Hg).

La comparaison des résultats de cette seconde étude avec ceux de la première, ainsi que l'analyse des boues de rejet du forage, vont nous permettre de vérifier si oui ou non les opérations de forage modifient la composition métallique des eaux de surface des rivières proches du site.

Nous avons procédé à l'analyse de ces métaux sur les fractions dissoute et particulaire des eaux de surface autour du site de manière à faciliter l'interprétation des résultats.

Les teneurs mesurées en décembre et mai 1995 sont présentées dans le tableau 5.1 et tracées en figure 5.1. Pour les éléments suivants : **arsenic, bore, cadmium, chrome, cuivre, plomb, sélénium et zinc**, les valeurs présentées dans la fraction totale correspondent à des **maxima** car les concentrations mesurées dans la fraction dissoute sont inférieures ou égales à la limite de détection.

En particulier, l'élévation générale des teneurs en métaux sur les rivières Tuichi et Béni mesuré en décembre par rapport aux résultats de mai, s'expliquent par la **plus forte concentration des eaux en matériel en suspension**. C'est également le cas pour les boues de forage où les MES atteignent  $27 \text{ g.l}^{-1}$ , ce qui signifie que, le jour du prélèvement, les boues prélevées dans un ruisseau en aval du puits, **n'ont pratiquement pas été diluées par les eaux de pluie**. En effet, dans la fraction dissoute, les éléments métalliques mesurés dans ces mêmes rivières présentent des concentrations plus faibles en décembre qu'en mai 1995. En général, les teneurs sont plus élevées sur la fraction particulaire principalement en raison du processus d'adsorption des éléments métalliques sur les particules.

Le seul point de référence non affecté par les boues de forage est T1, l'Arana en amont du campement et du puits. Les différences observées en ce point de référence entre les résultats de mai et décembre s'expliquent essentiellement par l'évolution temporelle du régime hydrologique. C'est la raison pour laquelle l'interprétation des résultats en ce point nous permettra de vérifier l'influence des débits sur les teneurs en métaux.



boues de forage

mg

|    |              |      |        |       |      |       |       |       |      |        |       |        |
|----|--------------|------|--------|-------|------|-------|-------|-------|------|--------|-------|--------|
| T1 | Arana amont  | 2.91 | 2496.9 | 53.33 | 0.48 | 41.21 | 36.36 | 18.18 | 2.42 | 84.85  | 2.42  | < 0.12 |
| T2 | Boues        | 2.47 | 12166  | 6.18  | 0.49 | 21.02 | 51.93 | 34.62 | 2.47 | 128.59 | 45.25 | < 1.24 |
| T3 | Tuichi amont | 3.56 | 119.55 | 23.7  | 0.50 | 47.47 | 8.39  | 13.33 | 2.94 | 118.51 | 17.48 |        |
| T6 | Tuichi amont | 1.30 | 150.77 | 1.02  | 0.08 | 12.63 | 11.41 | 15.48 | 0.41 | 52.97  | 16.95 | < 0.20 |
| T7 | Tuichi aval  | 1.60 | 154.54 | 74.61 | 0.11 | 17.05 | 14.39 | 17.59 | 0.53 | 69.81  | 19.18 | < 0.27 |
| T8 | Béni amont   | 5.97 | 127.44 | 17.92 | 0.32 | 17.12 | 11.95 | 21.11 | 0.40 | 99.56  | 20.59 | < 0.20 |
| T7 | Béni aval    | 5.92 | 162.93 | 3.70  | 0.30 | 20.24 | 17.77 | 24.69 | 0.49 | 110.60 | 28.73 | < 0.25 |

|    |              |     |      |     |       |     |     |     |     |     |      |     |
|----|--------------|-----|------|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| T1 | Arana amont  | < 2 | 310  | 13  | < 0.5 | < 2 | 9   | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T2 | Boues        | < 2 | 203  | < 5 | < 0.5 | < 2 | 8   | < 2 | < 2 | < 2 | 45   | < 1 |
| T6 | Tuichi amont | < 2 | 6.69 | 4   | < 0.5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T7 | Tuichi aval  | < 2 | 44   | 7   | < 0.5 | < 2 | 3   | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T8 | Béni amont   | < 2 | 20   | < 5 | < 0.5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T9 | Béni aval    | < 2 | 28   | 9   | < 0.5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |

mg

|    |              |       |        |        |       |       |        |        |       |        |        |         |
|----|--------------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|
| T1 | Arana amont  | 2.32  | 584.67 | 18.87  | 0.55  | 6.53  | 13.00  | 4.00   | 2.27  | 11.33  | 0.28   | < 1.01  |
| T2 | Boues        | 68.67 | 328203 | 171.67 | 13.83 | 568.7 | 1408.0 | 935.33 | 68.67 | 3468.7 | 1220.0 | < 34.33 |
| T6 | Tuichi amont | 3.07  | 166.33 | 5.83   | 0.57  | 12.33 | 11.33  | 14.67  | 2.33  | 45.33  | 13.88  | < 1.17  |
| T7 | Tuichi aval  | 3.11  | 151.41 | 58.85  | 0.57  | 13.85 | 13.00  | 14.22  | 2.37  | 50.52  | 13.34  | < 1.19  |
| T8 | Béni amont   | 7.56  | 138.52 | 21.67  | 0.80  | 17.93 | 13.11  | 21.63  | 2.37  | 94.59  | 19.16  | < 1.19  |
| T9 | Béni aval    | 6.62  | 154.92 | 11.88  | 0.73  | 17.77 | 15.85  | 21.23  | 2.38  | 88.15  | 22.39  | < 1.19  |

## 5.1 L'arsenic

En ce qui concerne les rivières échantillonnées, dans la fraction dissoute, les teneurs en arsenic restent inférieures à  $2 \mu\text{g l}^{-1}$  ; dans la fraction particulaire des eaux du Tuichi et du Béni, ces teneurs sont de 2 à 4 fois plus faibles que celles mesurées en mai, de 1 à  $6 \mu\text{g g}^{-1}$ , ce qui signifie que les boues ne sont pas contaminées en arsenic. Au total, les teneurs en arsenic dans les eaux de rivière sont comprises entre 2 et  $7 \mu\text{g l}^{-1}$ , ce qui reste largement inférieur aux valeurs maximales admises pour les rejets en Bolivie, de  $1 \text{mg.l}^{-1}$ .

Les rejets des boues de forage n'entraînent aucune contamination des eaux par l'arsenic.

## 5.2 Le baryum

**Le baryum est l'élément qui présente le plus fort taux de contamination dans les boues de forage.**

En effet, la teneur mesurée dans les boues s'élève à  $330 \text{mg l}^{-1}$ , ce qui dépasse plus de 300 fois la limite de rejet proposée en Bolivie. Cette très forte quantité est due, en particulier, à l'utilisation de la baryte au cours des opérations de forage.

Dans les eaux de l'Arana et du ruisseau en aval du site, les teneurs obtenues sont relativement élevées aussi bien dans la fraction dissoute que particulaire ; leur teneur totale s'élève à  $600 \mu\text{g l}^{-1}$  contre  $153 \pm 13 \mu\text{g l}^{-1}$  dans les eaux du Tuichi et du Béni. Cette forte teneur rend **les eaux de l'Arana impropres à la consommation** si l'on se réfère au niveau guide imposé par la Directive des Communautés Européennes, de  $100 \mu\text{g l}^{-1}$ .

D'après les résultats obtenus, **cette contamination est perceptible dans les eaux du Tuichi à l'aval de sa confluence avec l'Arana.** Entre mai et décembre, les concentrations en baryum passent de 34 à  $154 \mu\text{g g}^{-1}$  dans les eaux du Tuichi aval. Les fortes valeurs mesurées en amont peuvent cependant s'expliquer par une contamination de l'appareil après le passage de l'échantillon T2 ; mais les résultats du prélèvement T1 nous indiquent que, d'une manière générale, les teneurs mesurées en décembre sont plus élevées que celles mesurées en mai.

Nous pouvons également remarquer que cette contamination a une **légère influence** sur les teneurs en baryum **dans les eaux du Béni** car les teneurs mesurées dans les fractions particulaires augmentent d'environ 30 % entre l'amont et l'aval de la confluence avec le Tuichi.

## 5.3 Le bore

Le bore mesuré en référence dans les eaux de l'Arana en amont du site de forage présente des concentrations plus de 2 fois plus élevées en décembre qu'en mai 1995.

**Cependant, l'influence des boues de forage sur cet élément dans les eaux du Tuichi n'est pas négligeable.** En effet, ces teneurs passent de 1 à  $75 \mu\text{g g}^{-1}$  et de 6 à  $59 \mu\text{g l}^{-1}$ , soit un facteur 10, entre l'amont et l'aval de la confluence avec l'Arana contaminé.

La teneur totale en bore obtenue dans les boues est de  $170 \mu\text{g l}^{-1}$ , ce qui reste largement en-deçà de la norme de rejet imposée en Bolivie, de  $1000 \mu\text{g l}^{-1}$  mais cette teneur est 10 fois plus élevée que celle des eaux de l'Arana, en amont. En revanche, **cette pollution n'est plus perceptible dans les eaux du Béni.** Etant donné l'affinité considérable du bore pour le système nerveux, les critères américains ainsi que la directive des Communautés européennes indique comme teneur dans l'eau destinée à la consommation humaine, un niveau guide de  $1 \text{mg l}^{-1}$ . En référence à cet élément, les eaux de l'Arana, durant les opérations de forage, restent donc propres à la consommation.

## 5.4 Le cadmium

Les concentrations en cadmium mesurées dans les fractions dissoute et particulaire des boues de forage ne présentent pas de valeur significative d'une pollution particulière. La teneur totale de  $14 \mu\text{g l}^{-1}$  obtenue dans les boues s'expliquent par la très forte charge particulaire ; cette teneur reste largement en deçà de la limite de rejet imposée à  $1 \text{mg l}^{-1}$ .

**Il n'y a donc pas de contamination en cadmium qui aurait pu être due aux opérations de forage.**



## 5.9 Le zinc

Les concentrations en zinc mesurées dans les boues de forage sont relativement importantes puisqu'elles atteignent  $130 \mu\text{g g}^{-1}$ , ce qui représente, étant donné leur forte charge particulaire, une teneur totale de  $3,5 \text{ mg l}^{-1}$ .

L'influence de la contamination de l'Arana en zinc n'est pas négligeable dans les eaux du Tuichi dont la teneur en zinc de ses particules augmentent de 32 %. En revanche, cette augmentation est moins marquée dans les eaux du Béni (10 %). C'est en raison de leur forte turbidité due au fait que les prélèvements aient été réalisés en saison des pluies, que les concentrations moyennes obtenues dans les eaux du Béni en décembre,  $90 \mu\text{g l}^{-1}$ , sont plus élevées que celles de mai, où elles atteignaient  $14 \mu\text{g l}^{-1}$ .

Il apparaît donc que l'influence du régime hydrologique (saison des pluies) sur les teneurs en zinc des eaux de surface est prépondérante face à celle des boues de forage.

## 5.10 Le fer

Comme nous avons pu l'observer au cours de la campagne précédente, le fer est naturellement largement répandu dans le bassin versant étudié ; il est représentatif, en particulier, des zones à pyrites localisées dans les hauts bassins du Béni et exploitées pour leur or, souvent associé. Dans le bassin étudié, le fer est surtout présent dans les alluvions ; les ions métalliques peuvent alors précipiter lors de la remise en suspension des boues dans les eaux de surface, principalement en saison des pluies où la turbulence est plus forte ainsi que les apports.

Ainsi le régime hydrologique (saison des pluies) et la nature du bassin versant traversé, particulièrement riche en fer, expliquent l'augmentation des teneurs en fer mesurées dans les eaux du Tuichi et du Béni entre les mois de mai et de décembre 1995. Cette augmentation dans les eaux est de 500 à 800 %.

L'enrichissement en fer des particules dans les eaux du Tuichi dû aux boues de forage est de 13 %, et n'est pas perceptible dans les eaux. L'influence des boues de forage dans la richesse en fer des particules transportées par les eaux du Tuichi et du Béni est négligeable par rapport à la richesse naturelle du bassin versant.

Cependant, le contenu en fer des boues de forage est 100 fois supérieur à la valeur seuil de rejet admise en Bolivie.

Cette fois-ci, les teneurs en fer mesurées dans les eaux de l'Arana sont situées à la limite des normes de potabilité fixées par la directive CE.

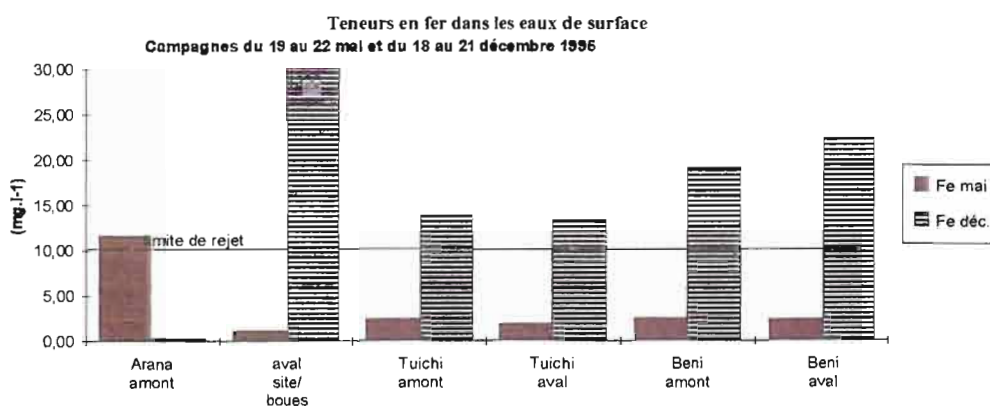
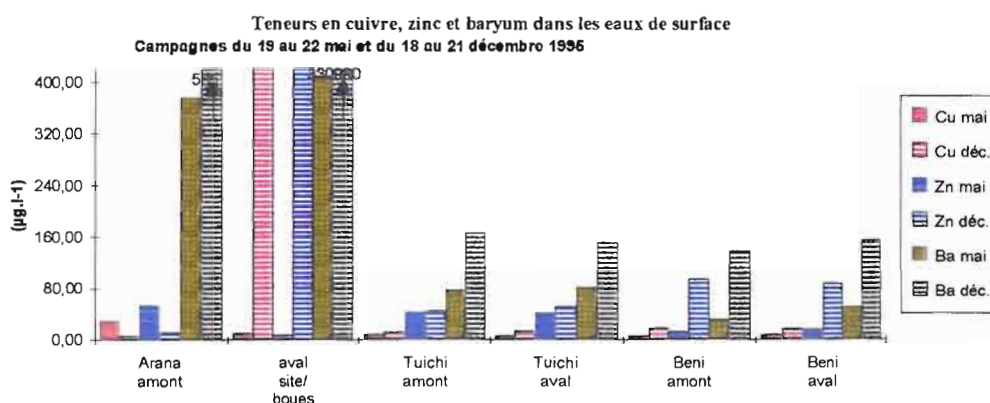
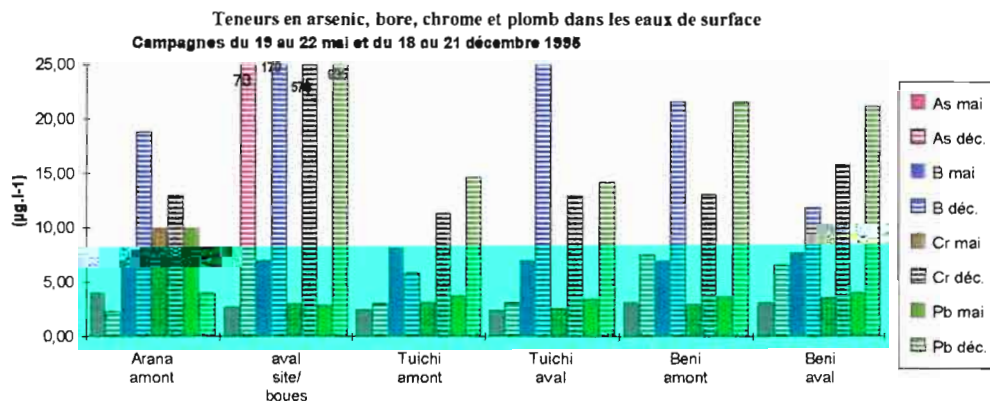
## 5.11 Le mercure

Aucune contamination en mercure n'a été mesurée dans les boues de forage ; la valeur maximale possible dans les boues est de  $34 \mu\text{g Hg l}^{-1}$ , ce qui reste largement en deçà de la valeur seuil imposée pour les rejets, de  $50 \mu\text{g l}^{-1}$ .

En ce qui concerne les rivières échantillonnées, les valeurs obtenues sont très faibles puisque l'ensemble des valeurs reste comprises dans la gamme :  $1,15 \mu\text{g l}^{-1} \pm 0,05 \mu\text{g l}^{-1}$ .

Il n'y a donc pas de contamination par le mercure des rivières Arana, Tuichi et Béni aux points de mesure.

**Figure 5.1. Evolution des teneurs en éléments métalliques (As, Ba, B, Cu, Cr, Pb et Zn exprimées en  $\mu\text{g.l}^{-1}$  et Fe exprimées en  $\text{mg.l}^{-1}$ ) dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni.**





## Références bibliographiques

oOo

- Gibbs R.J., 1972. Water chemistry of the Amazon river. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 36: 1061-1066.
- Gibbs R.J., 1973. Mechanisms of trace metal transport in rivers. *Science*, 180: 71-73.
- Guyot J.L., 1993. Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. *Thèse Eds. ORSTOM*, 261 pages.
- Konhauser K.O., Fyfe W.S. and Kronberg B.I., 1994. Multi-element chemistry of some amazonian waters and soils. *Chem. Geol.*, III: 155-175.
- Rodier J., 1984. L'analyse de l'eau. Ed. Dunod.