

**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 YARIAPO
SUR LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE
DES RIOS BENI, TUICHI ET ARANA**

oOo

**ANALYSE DE LA QUALITE
PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE
DES EAUX DU CAMP**

2 - CAMPAGNE DE MESURES DU 18 AU 20 DECEMBRE 1995

ECHANTILLONNAGE DES RIOS BENI, TUICHI ET ARANA

ET DES EAUX DU CAMPEMENT

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| RAPPEL DE L'ETUDE DE L'ETAT ZERO ET OBJECTIF | 4 |
| 1 - RECUEIL DES DONNEES | 5 |
| 1.1 PRESENTATION DE LA SECONDE CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS | 5 |
| 1.2 MATERIEL ET METHODES | 5 |
| 2 - LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES | 8 |
| 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 |
| 3 - LES CATIONS ET LES ANIONS MAJEURS | 10 |
| 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 |
| 4 - LES GERMES PATHOGENES | 15 |
| 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 |
| 5 - LES ELEMENTS METALLIQUES | 16 |
| 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 |
| RESUME - CONCLUSION | 22 |

RAPPEL DE L'ETUDE DE L'ETAT ZERO ET OBJECTIF

Cette proposition fait suite à une précédente étude réalisée par l'Orstom, pour le compte de TOTAL, visant à évaluer le niveau de qualité des eaux de rivières situées autour du site d'exploration, avant le forage. Les résultats relatifs à cette première étude ont été obtenus à partir d'une campagne de prélèvements réalisée du 18 au 24 mai 1995, dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni.

D'après cette première étude, il apparaît que les eaux de surface autour du site sont d'une bonne qualité générale. Mais cet état zéro a permis de mettre en évidence *une forte charge particulière et une légère contamination en fer des eaux de surface de l'Arana* ainsi qu'une forte minéralisation des deux rivières les plus proches du campement. La minéralisation plus importante des eaux de l'Arana reste de toute façon inférieure à celle des eaux minérales distribuées en France et ne dépasse pas les valeurs guides de potabilité préconisée par la directive des Communautés Européennes. Cependant, la charge particulière de l'eau de surface de l'Arana obtenue près de la berge, s'est révélée trop élevée pour pouvoir l'ingérer directement ; en effet, nous avons préconisé de la laisser décanter pour ne récupérer que l'eau de surface avant de la faire bouillir ou de la traiter avec un bactéricide. Cette opération permet également de réduire la teneur de l'eau en fer, présent essentiellement sous forme particulière.

En ce qui concerne les risques de pollution par le mercure, les analyses n'ont révélé aucune contamination en mercure dissous ; les teneurs étant, au pire, 500 fois inférieures à la valeur seuil de rejet proposée en Bolivie.

Cet état zéro réalisé, il est **prudent de surveiller si les travaux liés au forage ne risquent pas de contaminer les eaux des rivières situées autour du site. C'est l'objectif de cette seconde étude.**

Selon la même procédure que celle adoptée pour réaliser l'état zéro de la qualité des eaux des rivières concernées par le projet, nous avons analysé les mêmes paramètres physico-chimiques classiques ainsi que les mêmes métaux contenus dans les fractions dissoutes et particulières des eaux de surface.

Pour ce faire, une seconde campagne de prélèvements a été organisée, du 18 au 20 décembre 1995. Afin de comparer les résultats avec ceux obtenus lors de la précédente campagne qui sert d'état de référence, les prélèvements ont été réalisés aux mêmes points, sauf pour le rio en contrebas du site du forage qui a été remplacé par le ruisseau recevant directement les boues, soit :

- 1 sur le rio Arana, en amont du point de rejet des eaux et boues du forage,
- 1 dans le ruisseau où sont déversées les boues de forage,
- 2 sur le rio Tuichi, en amont et en aval de la confluence avec le rio Arana,
- 2 sur le rio Béni, en amont de la confluence avec le Tuichi et en aval (Angosto del Bala).

Pour suivre le bon déroulement des opérations de forage, un second campement a été mis en place, au niveau du puits d'exploration mais sans accès direct à la rivière. L'eau de consommation courante de ce second campement est amenée d'un puits creusé dans le lit de l'Arana, puis traitée. Afin de vérifier la potabilité de cette eau, utilisée pour l'alimentation de 70 personnes présentes en moyenne sur le camp, il nous a été demandé d'analyser la minéralisation ainsi que la qualité bactériologique des eaux suivantes :

- eau du robinet, dans les cuisines du campement
- eau de pompage, à la sortie du puits
- eau de rejet de la fosse septique

Donc, au niveau des 3 derniers prélèvements, seuls les éléments majeurs, anions et cations, ainsi que la qualité bactériologique, ont été mesurés.

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 :

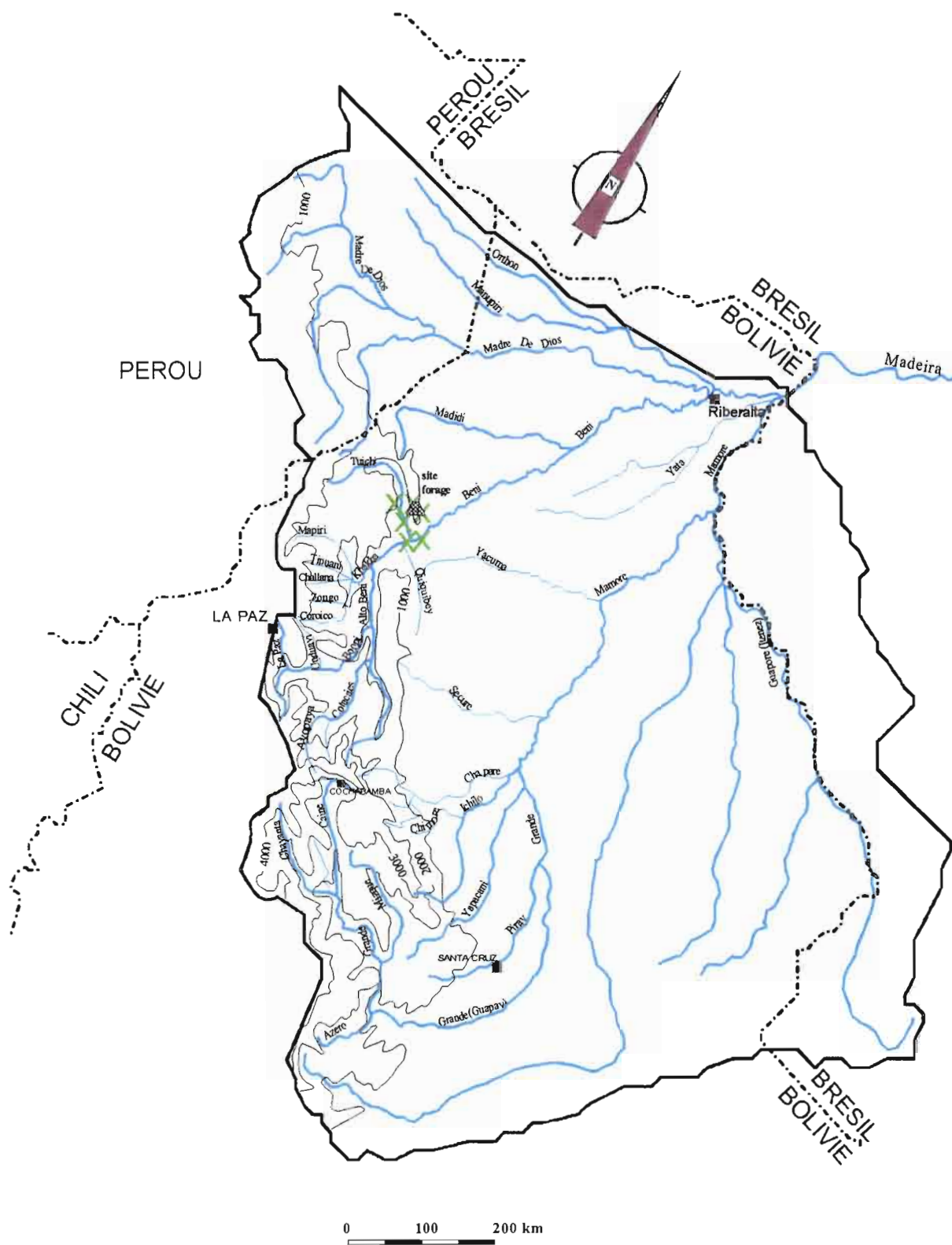
- **Paramètres physico-chimiques** : température, pH, conductivité, matières en suspension et contenu en matière organique.
- **Sels majeurs et éléments nutritifs** : calcium, magnésium, potassium, sodium, silice, chlorures, bicarbonates, nitrates, sulfates, et phosphates.
- **Éléments métalliques** : 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.



Les ions majeurs ainsi que les éléments métalliques de ces échantillons ont été analysés au Service Central d'Analyses du CNRS, (France). Etant donné les faibles concentrations d'éléments métalliques généralement rencontrées dans les eaux naturelles, nous avons confié les échantillons à un laboratoire CNRS qui dispose d'outils analytiques performants.

Lors de cette campagne, la température, la conductivité et le pH ont été suivis à l'aide de sondes (HASCH) *in situ*. La concentration en oxygène dissous a été déterminée par la méthode Winkler, au laboratoire de l'UMSA-IIQ (Instituto en Investigaciones Quimicas) de La Paz.

Les méthodes d'analyse sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1.1. Méthodes d'analyses des éléments physico-chimiques et chimiques des échantillons d'eau de rivière.

| Eléments | Méthode | Laboratoire |
|--|--|------------------------------------|
| Physico-chimiques | | |
| MES | pesée après filtration et séchage à 110°C pendant 3 heures | UMSA, La Paz |
| matière organique particulaire | pesée après passage à 450°C pendant 24h | UMSA, La Paz |
| oxygène dissous | Méthode Winkler | UMSA, La Paz |
| Chimiques | | |
| Majeurs | | |
| Cations | | |
| CaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O | ICP-AES, Atomic Emission Spectrometry | Service Central d'Analyses du CNRS |
| Anions | | |
| NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻⁻ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ | Chromatographie ionique Titration à l'acide | Service Central d'Analyses du CNRS |
| Métaux | | |
| As, Ba, Bo, Cd, Cu, Cr, Pb, Se, Zn | ICP-MS, Inductively Conducted Plasma-Mass Spectrometry | Service Central d'Analyses du CNRS |
| Fe | ICP-AES, Atomic Emission Spectrometry | Service Central d'Analyses du CNRS |
| Hg | Spectrométrie de fluorescence atomique | LPCM, Villefranche/Mer |

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 ₁ | Arana amont face campement | Campement TOTAL | S 14° 27' 43" W 67° 46' 45" | 18/12/95 11H00 | 30,2 | 7,85 | 339 | 110 | 4,20 |
| T ₂ | rio rejet boues de forage | Campement TOTAL | S 14° 28' 12" W 67° 46' 46" | 18/12/95 11H30 | 29,0 | 8,80 | 806 | 26 960 | 7,50 |
| T ₃ | Eau pompage sortie puits | Campement TOTAL | S 14° 28' 12" W 67° 46' 46" | 18/12/95 14H00 | - | 6,54 | 512 | - | |
| T ₄ | Eau rejet fosse septique | Campement TOTAL | S 14° 28' 12" W 67° 46' 46" | 18/12/95 14H30 | - | 7,41 | 402 | - | |
| T ₅ | Eau robinet cuisine | Campement TOTAL | S 14° 28' 12" W 67° 46' 46" | 18/12/95 15H00 | - | 7,25 | 382 | - | |
| T ₆ | Tuichi amont confl. Arana | Rurrenabaque | S 14° 29' 49.5" W 67° 48' 59.3" | 19/05/95 11H30 | 27,5 | 7,20 | 68 | 818 | 3,65 |
| T ₇ | Tuichi aval confl. Arana | Rurrenabaque | S 14° 32' 07.1" W 67° 45' 10.3 " | 19/05/95 12H10 | 28,0 | 7,13 | 69 | 695 | 4,90 |
| T ₈ | Béni amont confl. Tuichi | Rurrenabaque | S 14° 35' 24.0" W 65° 31' 57.9" | 19/05/95 15H10 | 28,8 | 7,13 | 99 | 930 | 5,13 |
| T ₉ | Béni aval confl. Tuichi | Rurrenabaque | S 14° 31' 37.1" W 67° 29' 50.1" | 19/05/95 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⁻¹ dans le rio Tuichi à 91 ± 8 µS cm⁻¹ dans le Béni pour atteindre 339 µS cm⁻¹ 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⁻¹ 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⁻¹).

2.4 Les matières en suspension

Les matières en suspension (MES) mesurées cette campagne-ci sur l'Arana sont de 110 mg l⁻¹, 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⁻¹ 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⁻¹ ; 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⁻¹, 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⁻¹, 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

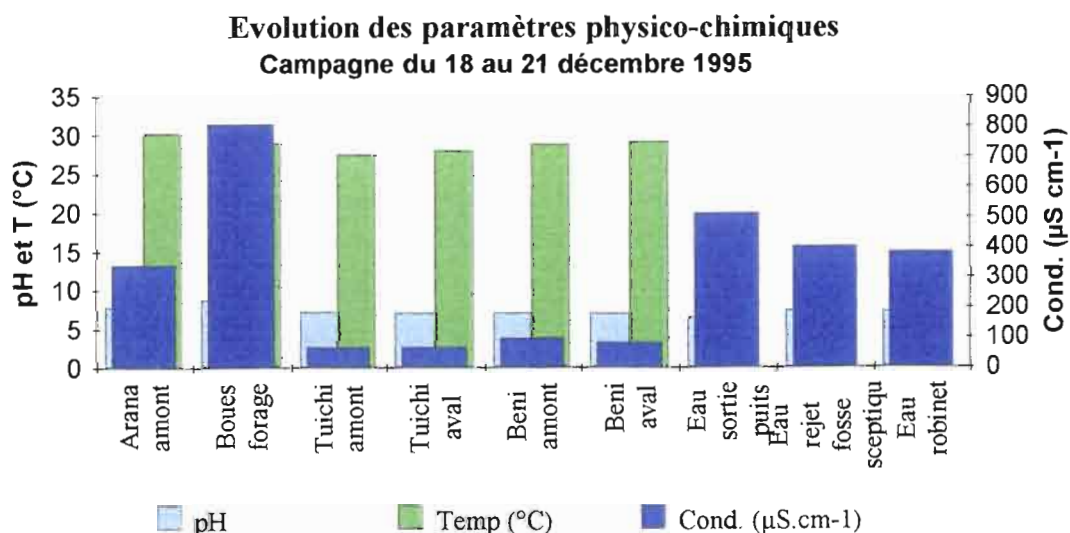
La fraction organique du matériel en suspension contenu dans les eaux de rivière échantillonnées est en moyenne de 4,6 ± 1 % MES, ce qui est tout-à-fait classique puisque dans ce type de rivière, les valeurs moyennes de contenu en matériel organique oscillent autour de 5 % MES.

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⁻¹, 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.



3 - LES CATIONS ET LES ANIONS MAJEURS

Le contenu ionique d'une eau naturelle permet de classer cette eau suivant la répartition de ces ions.

Selon la même méthodologie que celle utilisée pour les échantillons de la première campagne, nous avons estimé pour chaque échantillon d'eau prélevée dans les rivières et sur le campement TOTAL où se trouve le puits et la station de traitement de l'eau, la minéralisation de ces eaux à partir de l'analyse de 4 anions (HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{--}) et de 4 cations (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+) majeurs.

Les résultats obtenus en décembre 1995 sont comparés à ceux de mai, avant que les travaux de forage ne commencent (tableau 3.1).

Tableau 3.1. Concentrations en anions et cations majeurs analysés dans les eaux de rivière autour du site de forage ainsi que du camp, du 19 au 21 décembre 1995. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus dans les eaux de surface du 19 au 24 mai 1995 (en italique).

| Stations | Ca | Mg | K | Na | HCO_3 | Cl | NO_3 | SO_4 | SiO_2 | Cond labo | pH labo |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | mg/l | $\mu\text{S/cm}$ | |
| Arana amont | 58,4 <i>38,2</i> | 9,4 <i>7,2</i> | 5,2 <i>3,6</i> | 13,7 <i>9,6</i> | 256 <i>158</i> | 2,0 <i>2,4</i> | 7,6 <i>0,0</i> | 42,0 <i>23,7</i> | 6,3 <i>9,5</i> | 339 <i>329</i> | 7,85 <i>7,64</i> |
| Boues <i>rio aval site</i> | 2,8 <i>44,8</i> | 0,3 <i>12,6</i> | 1,3 <i>3,3</i> | 2,8 <i>2,2</i> | 18 <i>180</i> | 1,7 <i>0,0</i> | 0,0 <i>0,0</i> | 2,1 <i>16,3</i> | 1,0 <i>10,0</i> | 806 <i>399</i> | 8,80 <i>7,86</i> |
| Tuichi amont | 7,9 <i>6,1</i> | 2,0 <i>2,3</i> | 0,9 <i>0,9</i> | 1,8 <i>1,5</i> | 35 <i>25</i> | 0,4 <i>0,0</i> | 0,2 <i>0,0</i> | 9,8 <i>8,8</i> | 3,5 <i>7,8</i> | 68 <i>72</i> | 7,20 <i>7,03</i> |
| Tuichi aval | 8,1 <i>7,0</i> | 2,2 <i>2,4</i> | 0,9 <i>0,9</i> | 1,8 <i>1,7</i> | 36 <i>29</i> | 0,5 <i>0,0</i> | 0,2 <i>0,0</i> | 9,9 <i>8,9</i> | 3,4 <i>8,0</i> | 69 <i>77</i> | 7,13 <i>7,05</i> |
| Béni amont | 9,8 <i>9,2</i> | 3,7 <i>4,6</i> | 1,1 <i>0,9</i> | 3,2 <i>3,6</i> | 35 <i>31</i> | 1,1 <i>2,5</i> | 0,5 <i>3,7</i> | 22,0 <i>23,3</i> | 4,0 <i>9,1</i> | 99 <i>118</i> | 7,13 <i>7,05</i> |
| Béni aval | 9,6 <i>9,6</i> | 3,3 <i>4,3</i> | 1,15 <i>0,9</i> | 2,9 <i>3,3</i> | 37 <i>35</i> | 0,9 <i>2,5</i> | 0,4 <i>0,0</i> | 18,0 <i>19,1</i> | 3,9 <i>9,1</i> | 83 <i>106</i> | 7,07 <i>7,03</i> |
| Eau robinet | 56,9 | 9,1 | 5,4 | 13,2 | 255 | 4,5 | 4,4 | 35,0 | 6,0 | 382 | 7,25 |
| Valeur guide potabilité CE | 100 à 150 | 30 | 12 | 20 | | 25 à 200 | 25 | 25 | 20 | | |
| Eau puits | 91,7 | 12,9 | 3,3 | 3,7 | 527 | 0,0 | 0,0 | 1,2 | 9,1 | 512 | 6,54 |
| Eau fosse septique | 56,0 | 12,1 | 7,6 | 11,4 | 304 | 5,1 | 4,7 | 5,7 | 6,2 | 402 | 7,41 |
| Valeurs max. admisses pour rejet | 700 | | | | | 2500 | 100 | 8000 | | | |

Comme dans le cas des prélèvements de mai, les eaux prélevées dans le Béni et le Tuichi ont un faciès bicarbonaté sulfaté tandis que les eaux proches du site de forage, l'Arana, sont beaucoup plus minéralisées (figure 3.1) et particulièrement riches en calcium, magnésium, potassium, sodium et bicarbonates, ce qui explique la valeur de conductivité plus élevée. Le faciès géochimique de l'Arana est plutôt bicarbonaté calcique, ce qui est le cas de 95% des eaux de surface du monde (Gibbs, 1972).

C'est dans les boues de forage que la minéralisation est la plus faible, avec des teneurs en bicarbonates deux fois plus faibles que celles du Tuichi et du Béni et 14 fois plus faibles que celles de l'Arana.

L'eau du robinet, le jour du prélèvement, présentait une minéralisation légèrement trop faible comparativement aux valeurs guides de potabilité préconisée par la Directive des Communautés Européennes (tableau 3.1) avec, en revanche, des teneurs en sulfates trop élevées. Ceci s'explique par le fait que la minéralisation de l'eau du robinet du campement est identique à celle des eaux de l'Arana mais est moins riche en calcium et magnésium que l'eau à la sortie du puits. Il apparaît que le traitement réalisé sur ces eaux modifie peu leur minéralisation.

Dans tous les cas, les bicarbonates représentent l'essentiel de la charge anionique et même ionique.

3.1 Le calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates.

La valeur de calcium mesurée dans les eaux de l'Arana, les plus proches du site de forage, est plus élevée de 30 % que celle mesurée en mai puisqu'elle atteint 58 mg l^{-1} , tandis que les eaux du Béni et du Tuichi ne dépassent pas 10 mg Ca l^{-1} . Les valeurs mesurées dans le Tuichi et le Béni sont identiques à celles de mai et sont du même ordre de grandeur que celles obtenues entre 1983 et 1991 au cours d'un programme de recherche coordonné par l'Orstom dans le bassin du Béni (Guyot, 1993).

La teneur en calcium mesurée dans l'eau du robinet est cependant deux fois plus faible que la valeur guide recommandée pour les eaux potables de bonne qualité qui est de 100 mg l^{-1} de calcium.

3.2 Le magnésium

Comme dans le cas du calcium, les concentrations maximales sont mesurées dans les eaux de l'Arana où elles atteignent $9,4 \text{ mg l}^{-1}$, tandis que dans le Tuichi et le Béni, elles sont respectivement en moyenne de 2 et de $3,5 \text{ mg l}^{-1}$, c'est-à-dire identiques à celles mesurées en mai sur ces deux rivières.

En ce qui concerne la richesse en magnésium de l'eau distribuée sur le site de forage, elle est trois fois plus faible, 9 mg l^{-1} , que la valeur guide proposée par la directive des Communautés Européennes.

3.3 Le potassium

La teneur en potassium dans les eaux naturelles dépasse rarement 15 mg l^{-1} . Dans les eaux de l'Arana, en face du campement, la concentration en potassium est de $5,2 \text{ mg l}^{-1}$ tandis qu'elle est en moyenne de 1 mg l^{-1} dans le Béni et le Tuichi. La valeur moyenne interannuelle calculée sur le rio Béni, à Angosto del Bala, est de $1,4 \text{ mg l}^{-1}$ (Guyot, 1993), ce qui reste du même ordre de grandeur.

Il n'y a pas de différence de ces valeurs avec celles mesurées en mai, sur les rivières Tuichi et Béni.

Concernant l'eau prélevée au robinet, sa teneur en magnésium est deux fois plus faible que la valeur guide préconisée par la Directive CE, de 12 mg l^{-1} .

3.4 Le sodium

Comme en mai dernier, les eaux du Tuichi sont les moins riches en sodium, avec une concentration moyenne de $1,8 \text{ mg l}^{-1}$, contre 3 mg l^{-1} dans le Béni et 14 mg l^{-1} dans l'Arana.

La valeur obtenue dans l'eau du robinet est identique à celle mesurée dans l'Arana mais légèrement trop faible, 13 mg l^{-1} , pour répondre aux critères de potabilité fixés par la Directive CE, de 20 mg l^{-1} .

En ce qui concerne les eaux des rivières échantillonnées en décembre, à savoir, le Béni, le Tuichi et l'Arana, il n'y a pas de différence significative dans les teneurs en cations mesurées entre les deux campagnes, c'est-à-dire que les opérations de forage, en décembre, n'ont pas d'influence sur les teneurs en cations des eaux de surface des rivières avoisinant le site.

3.5 Les bicarbonates

Les bicarbonates représentent généralement l'essentiel des anions contenus dans les eaux naturelles. Dans les eaux prélevées dans l'Arana, le Tuichi et le Béni, les bicarbonates représentent respectivement 83 %, 77 % et 63 % de la charge anionique.

Les rapports les plus élevés sont obtenus dans les eaux du robinet, 85 %, et surtout du puits alimentant le camp, de 99,7 % de la charge anionique. Dans l'eau du robinet, les bicarbonates représentent 66 % de la charge ionique totale, contre 81 % dans les eaux du puits, ce qui est très élevé.

Ces bicarbonates proviennent de l'échange du CO_2 entre l'atmosphère et l'eau, également de l'altération chimique des sols du bassin traversé ainsi que de la dissolution des carbonates qui peuvent affleurer dans le bassin.

3.6 Les chlorures

Les teneurs en chlorures des eaux continentales sont extrêmement variées et dépendent principalement de la nature des terrains traversés et de l'occurrence des pluies à l'origine d'un lessivage ; elles sont généralement très faibles si elles n'ont aucun contact avec des eaux saumâtres ou marines.

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⁻¹ et dans l'Arana, de 2 mg l⁻¹. 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⁻¹. 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⁻¹, 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⁻¹, contre 21 mg l⁻¹ sur le Béni et 42 mg l⁻¹ 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⁻¹ (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⁻¹ est supérieure à la valeur guide proposée par la directive CE, de 25 mg l⁻¹ mais reste largement inférieure à la concentration maximale admissible, de 250 mg l⁻¹.

3.9 La silice

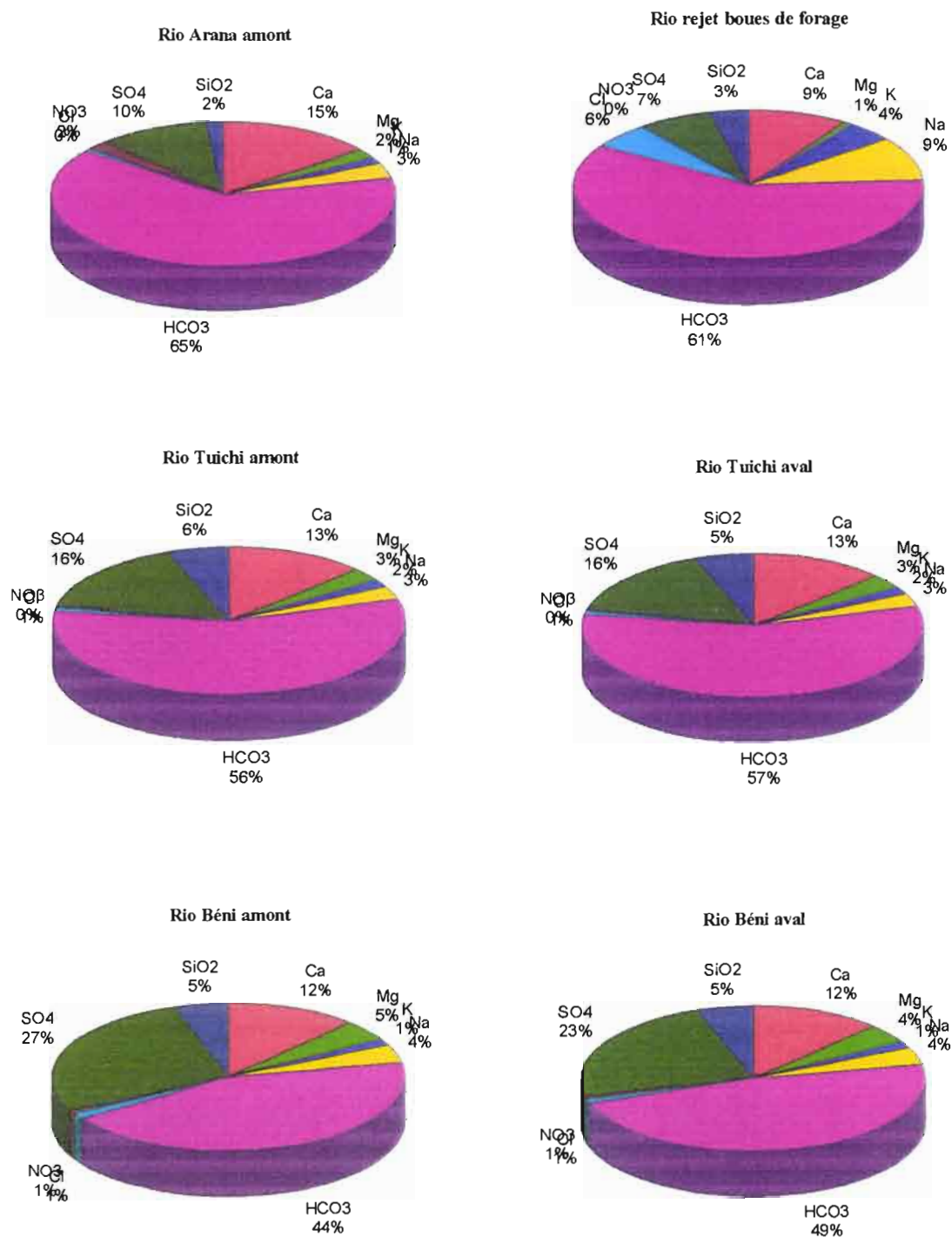
Dans les rivières échantillonnées, les concentrations en silice sont deux fois plus faibles en décembre qu'en mai. Elles varient de 3,5 à 4,0 mg l⁻¹ dans le Tuichi et le Béni et atteignent 6 mg l⁻¹ dans l'Arana. Les boues de forage n'en contiennent pratiquement pas, 1 mg l⁻¹. La silice ne représente 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.

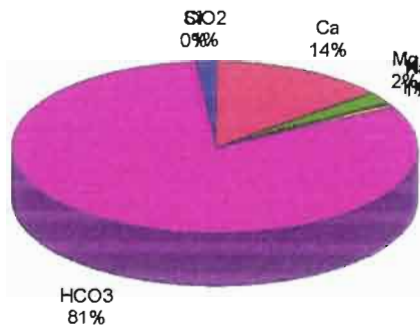
L'eau du robinet, le jour du prélèvement, présente une minéralisation légèrement trop faible comparativement aux valeurs guides de potabilité préconisées par la Directive des Communautés Européennes avec, en revanche, des teneurs en sulfates trop élevées. Cette eau apparaît donc trop faiblement minéralisée 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.

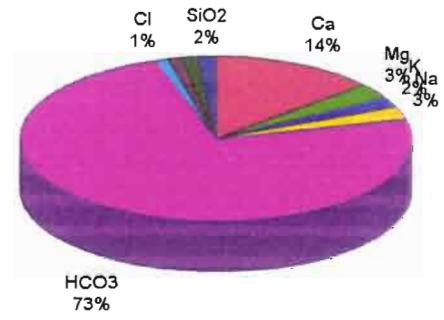
Figure 3.1. Répartition des ions majeurs analysés dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni ainsi que dans les eaux du cagement (en pourcentage de la charge pondérale minérale dissoute), du 19 au 21 décembre 1995.



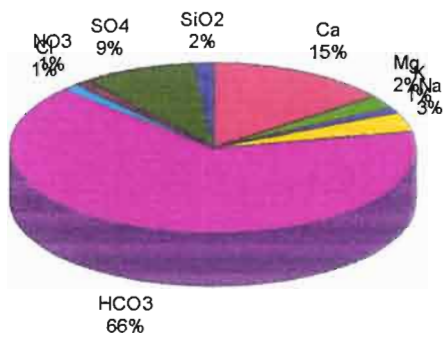
Sortie puits Arana



Rejet fosse sceptique



Eau du robinet du camp



4 - LES GERMES PATHOGENES

A la demande du responsable de camp, les micro-organismes pathogènes ont été déterminés sur les trois échantillons d'eau prélevés sur le site de forage, et particulièrement sur l'eau du robinet prélevée en cuisine.

Les prélèvements ont été conservés dans des flacons en verre, à 4 °C avant leur analyse, qui faute de laboratoire sur place, à Rurrenabaque, n'a pu se réaliser que 5 jours après leur prélèvement, de retour à La Paz. Les germes ont été déterminés dans le laboratoire d'analyses biochimiques Lab-Tek, après 48 heures de mise en culture dans des milieux aérobie et anaérobie.

Les germes les plus redoutables pour l'homme ont été recherchés ; il s'agit essentiellement de *Salmonella sp.*, dont l'action pathogène se manifeste à la suite d'infection par voie orale, et des *Escherichia Coli* spécifiques des gastro-entérites. Ces derniers sont utilisés surtout en hydrologie comme indicateur de contamination fécale

4.1 Analyse microbiologique de l'eau du robinet du camp

Après incubation pendant 48 heures, dans deux types de milieux, afin de mettre en évidence les germes aérobie et anaérobie, aucun développement bactérien pathogène n'a été signalé. Ceci signifie que cette eau, sur le plan bactériologique, est tout-à-fait consommable ; elle ne présentait, le jour du prélèvement, aucun germe de type *salmonella sp.* ou *Escherichia Coli* susceptible d'entraîner des troubles gastriques graves chez le personnel du camp.

4.2 Analyse microbiologique de l'eau de pompage en sortie du puits

Après incubation pendant 48 heures, des colonies d'*Escherichia Coli* ont été dénombrées à raison d'environ 4 000 bact/ml ainsi que des bactéries saprophytes, à un enrichissement d'environ 45 000 bact/ml. Ces valeurs ne sont pas représentatives du nombre exact de germes pathogènes contenus dans cette eau puisque l'incubation a été réalisée 5 jours après le prélèvement ; normalement, la conservation au frais des échantillons limite la production bactérienne, étant donné que même au cours du transport entre le site et Rurrenabaque, les échantillons ont été conservés dans une glacière.

La différence entre ces deux analyses bactériologiques nous indique que le traitement bactéricide réalisé sur l'eau du puits est efficace puisqu'il permet d'éliminer les principaux germes de contamination fécale.

4.3 Analyse microbiologique de l'eau de sortie de la fosse septique

Cette eau est la plus contaminée des trois types échantillonnés. En effet, le nombre de germes estimé est de 100 000 *Escherichia Coli*/ml et de 20 000 *Salmonella sp.*/ml. Ces très fortes valeurs, rendant cette eau évidemment impropre à la consommation, même après traitement, viennent du fait que le fonctionnement de la fosse septique installée sur le site n'est pas optimal, ce, probablement en raison des fortes chaleurs et humidité qui caractérisent le site.

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 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.

Tableau 5.1. Résultats des éléments métalliques mesurés dans les phases dissoutes et particulaires des eaux de l'Arana, du Tuichi et du Béni, du 19 au 22 mai 1995 et du 18 au 21 décembre 1995. Résultats dans les boues de forage prélevées en décembre 1995.

Fraction particulaire

| N° | Rio | As (µg/g) | Ba (µg/g) | B (µg/g) | Cd (µg/g) | Cu (µg/g) | Cr (µg/g) | Pb (µg/g) | Se (µg/g) | Zn (µg/g) | Fe (mg/g) | Hg (µg/g) |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T1 | Arana amont | 2,21 | 128,18 | 2,21 | 0,09 | 26,52 | 8,84 | 8,84 | 0,44 | 30,94 | 12,82 | |
| 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 | Aval site | 13,56 | 203,39 | 33,90 | 1,36 | 135,59 | 16,95 | 14,92 | 6,78 | 61,02 | 18,64 | |
| 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 | 118,52 | 23,70 | 0,59 | 47,41 | 8,89 | 13,33 | 2,96 | 118,52 | 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 |
| T4 | Tuichi aval | 3,10 | 34,11 | 15,50 | 0,62 | 37,21 | 4,65 | 11,47 | 3,10 | 155,04 | 11,78 | |
| 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 |
| T5 | Béni amont | 20,69 | 124,14 | 34,48 | 1,38 | 82,76 | 17,24 | 29,66 | 6,90 | 68,97 | 42,76 | |
| 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 |
| T6 | Béni aval | 10,17 | 101,69 | 23,73 | 0,68 | 54,24 | 13,56 | 16,95 | 3,39 | 50,85 | 19,32 | |
| 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 |

Fraction dissoute

| N° | Rio | As (µg/l) | Ba (µg/l) | B (µg/l) | Cd (µg/l) | Cu (µg/l) | Cr (µg/l) | Pb (µg/l) | Se (µg/l) | Zn (µg/l) | Fe (µg/l) | Hg (µg/l) |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T1 | Arana amont | < 2 | 260 | < 5 | < 0,5 | 5 | < 2 | < 2 | < 2 | 26 | 12 | 0,105 |
| T1 | Arana amont | < 2 | 310 | 13 | < 0,5 | < 2 | 9 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T2 | Aval site | < 2 | 398 | < 5 | < 0,5 | 2,5 | < 2 | < 2 | < 2 | 4 | 17 | 0,099 |
| T2 | Boues | < 2 | 203 | < 5 | < 0,5 | < 2 | 8 | < 2 | < 2 | < 2 | 45 | < 1 |
| T3 | Tuichi amont | < 2 | 62 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | 27 | 54 | 0,088 |
| T6 | Tuichi amont | < 2 | 43 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T4 | Tuichi aval | < 2 | 77 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | 22 | 323 | 0,091 |
| T7 | Tuichi aval | < 2 | 44 | 7 | < 0,5 | < 2 | 3 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T5 | Béni amont | < 2 | 25 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | 8 | 26 | 0,083 |
| T8 | Béni amont | < 2 | 20 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |
| T6 | Béni aval | < 2 | 39 | < 5 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | 10 | 69 | 0,1 |
| T9 | Béni aval | < 2 | 28 | 9 | < 0,5 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 2 | < 10 | < 1 |

Fraction totale

(valeurs max.)

| N° | Rio | As (µg/l) | Ba (µg/l) | B (µg/l) | Cd (µg/l) | Cu (µg/l) | Cr (µg/l) | Pb (µg/l) | Se (µg/l) | Zn (µg/l) | Fe (mg/l) | Hg (µg/l) |
|----|--------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| T1 | Arana amont | 4,00 | 376,00 | 7,00 | 0,58 | 29,00 | 10,00 | 10,00 | 2,40 | 54,00 | 11,61 | |
| 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 | Aval site | 2,80 | 410,00 | 7,00 | 0,58 | 10,50 | 3,00 | 2,88 | 2,40 | 7,60 | 1,12 | |
| T2 | Boues | 68,67 | 328203 | 171,67 | 13,83 | 568,7 | 1408,0 | 935,33 | 68,67 | 3468,7 | 1220,0 | < 34,33 |
| T3 | Tuichi amont | 2,48 | 78,00 | 8,20 | 0,58 | 8,40 | 3,20 | 3,80 | 2,40 | 43,00 | 2,41 | |
| 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 |
| T4 | Tuichi aval | 2,40 | 81,40 | 7,00 | 0,58 | 6,80 | 2,60 | 3,48 | 2,40 | 42,00 | 1,84 | |
| 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 |
| T5 | Béni amont | 3,20 | 32,20 | 7,00 | 0,58 | 6,80 | 3,00 | 3,72 | 2,40 | 12,00 | 2,51 | |
| 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 |
| T6 | Béni aval | 3,20 | 51,00 | 7,80 | 0,58 | 8,40 | 3,60 | 4,00 | 2,40 | 16,00 | 2,35 | |
| 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 |
| | Seuil rejet | 1000 | 1000 | 5000 | 1000 | 5000 | 5000 | 2000 | 500 | 15000 | 10 | 50 |

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 1mg.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 330mg 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 1mg 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 1mg l^{-1} .

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

Les teneurs mesurées dans les eaux de l'Arana proches du site sont inférieures à $0,6 \mu\text{g l}^{-1}$ et par là-même à la limite de potabilité imposée par la directive des Communautés européennes.

Dans les eaux de surface du Tuichi, les valeurs obtenues en décembre sont identiques à celles de mai, soit $0,57 \pm 0,01 \mu\text{g l}^{-1}$.

5.5 Le cuivre

Les teneurs en cuivre rapportées à la fraction particulaire obtenues en décembre sont plus faibles que celles obtenues en mai sauf dans les eaux de l'Arana qui cependant ne dépassent pas les limites de potabilité.

La concentration totale en cuivre mesurée dans les boues de forage, $570 \mu\text{g l}^{-1}$, reste inférieure à la valeur seuil de rejet.

On peut observer une augmentation de 35 % des teneurs en cuivre particulaire du Tuichi, de part et d'autre de sa confluence avec l'Arana mais ce contenu reste inférieur à celui mesuré en mai.

Seule l'augmentation de la charge particulaire semble expliquer les augmentations des teneurs en cuivre dans les eaux du Tuichi.

L'influence des boues de forage sur la qualité en cuivre des eaux de surface semble donc négligeable.

5.6 Le chrome

Le chrome contenu dans les boues de forage atteint au total $1400 \mu\text{g l}^{-1}$, ce qui est très élevé mais qui reste très largement en-dessous du seuil de rejet, fixé à 5mg l^{-1} .

L'influence de la contamination en chrome des eaux de l'Arana, induite en partie par les opérations de forage, se fait sentir à raison de 3 % seulement dans les eaux du Tuichi et de 5 % dans les eaux du Béni. Mais la différence de régime hydrologique est à l'origine de l'augmentation globale des teneurs en chrome mesurées entre mai et décembre 1995.

En conclusion, il n'y a pas d'influence significative des opérations de forage sur les teneurs en chrome dans les eaux de surface des rivières voisines, ce, en comparaison avec l'influence du régime hydrologique.

5.7 Le plomb

Le plomb analysé dans les eaux et les boues est essentiellement présent sous forme particulaire, adsorbé au matériel en suspension.

Les boues de forage présentent des teneurs en plomb de $35 \mu\text{g g}^{-1}$, ce qui représente au total plus de $900 \mu\text{g l}^{-1}$, soit 2 fois moins que la limite de rejet imposée en Bolivie.

Les teneurs en plomb adsorbé sur les particules mesurées dans les eaux du Tuichi augmentent de 14 % après mélange des eaux avec l'Arana, ce qui est supérieur à l'erreur de mesure et donc significatif d'un apport contaminé. Après mélange des eaux du Tuichi dans celle du Béni, cette influence est de 17 %.

Dans les rivières échantillonnées, les teneurs totales en plomb sont comprises entre 14 et $22 \mu\text{g l}^{-1}$, et sont de $4 \mu\text{g l}^{-1}$ dans l'Arana, valeur inférieure à la norme de potabilité.

5.8 Le sélénium

Les concentrations en sélénium mesurées dans les eaux de surface de l'Arana, du Tuichi et du Béni sont toutes situées dans une même gamme de valeur, et égales à $2,34 \pm 0,04 \mu\text{g l}^{-1}$, ce qui reste du même ordre de grandeur que les teneurs obtenues en mai.

Les boues de forage, dont les concentrations en sélénium, $69 \mu\text{g l}^{-1}$, ne sont pas négligeables puisqu'elles dépassent 6 fois la valeur limite de rejet adoptée en Bolivie, n'induisent aucune contamination des eaux de surface avoisinantes.

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.

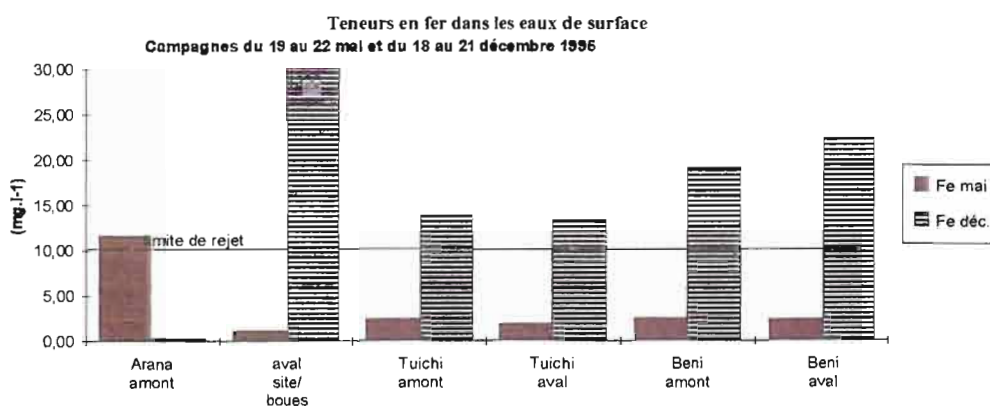
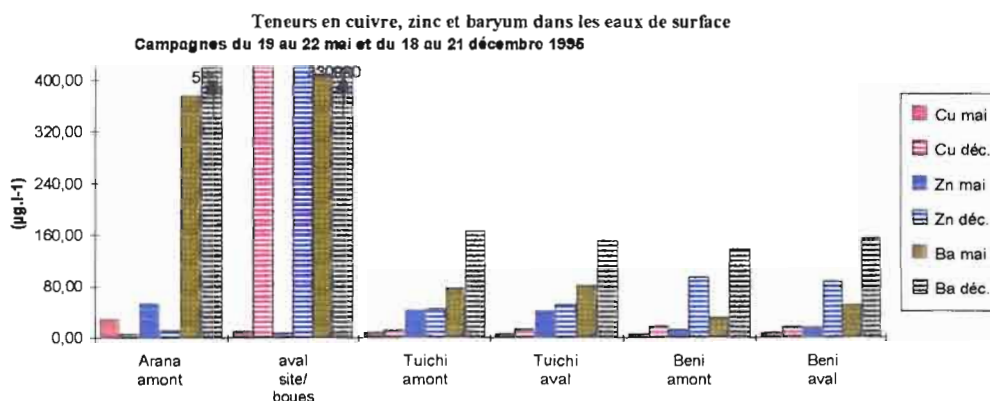
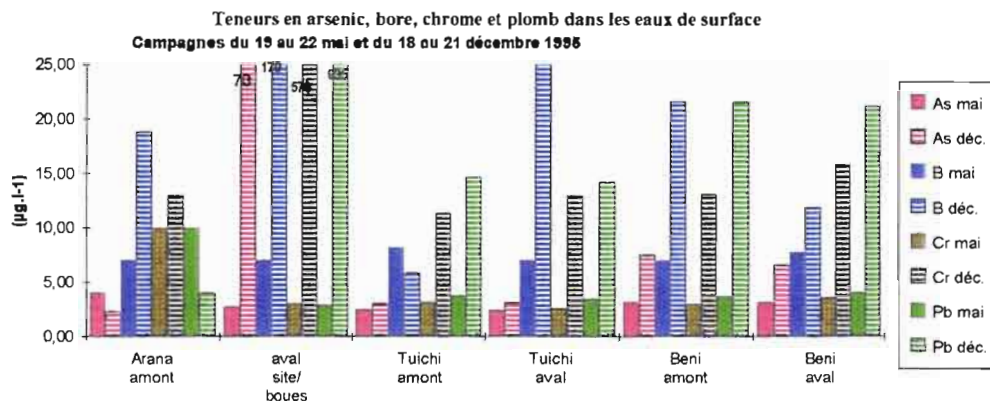
5.11 Le mercure

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 mg.l^{-1}) dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni.



RESUME - CONCLUSION

Afin de déterminer l'impact des opérations de forage sur la qualité physico-chimique et chimique des eaux, nous avons procédé à une étude comparée de la qualité des eaux de rivières avoisinant le site, aux mêmes points, complétée par l'analyse des boues rejetées, avant et au cours des opérations de forage. L'interprétation des résultats prend en compte la différence de régime hydrologique puisque l'état de référence a été réalisé en début de saison sèche tandis que la seconde campagne s'est déroulée en pleine saison des pluies. L'étude de la qualité de ces eaux a été menée à partir de l'analyse des principaux éléments physico-chimiques et chimiques contenus dans les fractions dissoutes et particulaires, à savoir, les anions et les cations majeurs, ainsi que 11 éléments métalliques : arsenic, baryum, bore, cadmium, cuivre, chrome, plomb, sélénium, zinc, fer, et mercure.

En ce qui concerne les résultats physico-chimiques, des prélèvements ont été réalisés dans les eaux du campement afin de vérifier leur potabilité. Comme dans le cas des prélèvements de mai, les eaux prélevées dans le Béni et le Tuichi ont un faciès bicarbonaté sulfaté tandis que les eaux proches du site de forage, l'Arana, sont beaucoup plus minéralisées et particulièrement riches en calcium, magnésium, potassium, sodium et bicarbonates, ce qui explique la valeur de conductivité plus élevée.

C'est dans les boues de forage que la minéralisation est la plus faible, avec des teneurs en bicarbonates deux fois plus faibles que celles du Tuichi et du Béni et 14 fois plus faibles que celles de l'Arana.

L'eau du robinet, le jour du prélèvement, présentait une minéralisation légèrement trop faible comparativement aux valeurs guides de potabilité préconisée par la Directive des Communautés Européennes avec, en revanche, des teneurs en sulfates trop élevées. Ceci s'explique par le fait que la minéralisation de l'eau du robinet du campement est identique à celle des eaux de l'Arana mais est moins riche en calcium et magnésium que l'eau à la sortie du puits. Il apparaît que le traitement réalisé sur ces eaux modifie peu leur minéralisation.

Sur le plan bactériologique, l'eau du robinet du camp est tout-à-fait consommable.

En ce qui concerne les eaux des rivières échantillonnées en décembre, à savoir, le Béni, le Tuichi et l'Arana, il n'y a pas de différence significative dans les teneurs en cations mesurées entre les deux campagnes, c'est-à-dire que les opérations de forage, en décembre, n'ont pas d'influence sur les teneurs en cations des eaux de surface des rivières avoisinant le site.

En ce qui concerne les éléments métalliques, le baryum est l'élément qui présente le plus fort taux de contamination dans les boues de forage. 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. En effet, les teneurs en baryum 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. En revanche, cette pollution n'est plus perceptible dans les eaux du Béni.

Les boues de forage, dont les concentrations en sélénium, de $69 \mu\text{g l}^{-1}$, ne sont pas négligeables puisqu'elles dépassent 6 fois la valeur limite de rejet adoptée en Bolivie, n'induisent aucune contamination des eaux de surface avoisinantes.

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. Cette remarque vaut pour le zinc dont les augmentations s'expliquent par la différence de régime hydrologique.

Les rejets des boues de forage n'entraînent aucune contamination des eaux par l'arsenic, le cadmium, le cuivre, le chrome, ni le mercure.

En conclusion, une faible minéralisation de l'eau de consommation du campement est à signaler mais le point le plus critique concerne la contamination des eaux de surface par le baryum due à l'utilisation au cours des opérations de forage de produits comme la baryte.

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.