



Institut Français de Recherche Scientifique
pour le Développement en Coopération
ORSTOM, BOLIVIE
CP 9214
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)

**COMPARAISON DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX
AVANT, PENDANT ET APRES LES OPERATIONS DE FORAGE**

RAPPORT III

Laurence MAURICE BOURGOIN

HYDROCONSULT INTERNATIONAL

GIE ORSTOM - EDF

Mai 1996

IMPACT DU FORAGE YARIAPO
SUR LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE
DES RIOS BENI, TUICHI ET ARANA

3 - CAMPAGNE DE MESURES DU 24 AU 28 MARS 1996
ECHANTILLONNAGE DES RIOS BENI, TUICHI ET ARANA
LES OPERATIONS DE FORAGE TERMINEES

Sommaire

RAPPEL DE L'ETUDE DE L'ETAT ZERO ET OBJECTIF	4
1 - RECUEIL DES DONNEES.....	4
1.1 PRESENTATION DE LA SECONDE CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS.....	4
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	Erreur ! Signet non défini.
3 - LES CATIONS ET LES ANIONS MAJEURS.....	10
3.1 LE CALCIUM	12
3.2 LE MAGNESIUM.....	12
3.3 LE POTASSIUM.....	12
3.4 LE SODIUM.....	12
3.5 LES BICARBONATES	12
3.6 LES CHLORURES	13
3.7 LES NITRATES	13
3.8 LES SULFATES.....	13
3.9 LA SILICE.....	13
4 - LES ELEMENTS METALLIQUES.....	15
5.1 L'ARSENIC	17
5.2 LE BARYUM	17
5.3 LE BORE.....	18
5.4 LE CADMIUM	18
5.5 LE CUIVRE	18
5.6 LE CHROME.....	18
5.7 LE PLOMB	18
5.8 LE SELENIUM	19
5.9 LE ZINC.....	19
5.10 LE FER	19
5.11 LE MERCURE.....	19
RESUME - CONCLUSION.....	21

RAPPEL DES ETUDES PRECEDENTES ET OBJECTIF

Après la réalisation d'un état zéro de la qualité des eaux de surface et du suivi des caractéristiques physico-chimiques de ces eaux de rivière pendant les opérations de forage, cette étude et dernière du contrat, vise à évaluer l'impact du puits d'exploration Yariapo, sur les rivières du bassin versant concerné.

Cette dernière prestation permettra d'estimer l'impact du forage sur la qualité des eaux de surface, en comparant d'une part, les résultats obtenus au cours des 3 campagnes de mesures, et en tenant compte, d'autre part, du régime hydrologique.

Les trois campagnes de terrain réalisées, dans les eaux de surface des rivières Arana, Tuichi et Béni sont les suivantes :

- 1. TOTAL I : du 18 au 24 mai 1995.**
Objectif : Etat zéro de la qualité des eaux de surface autour du site de forage
- 2. TOTAL II : du 18 au 20 décembre 1995.**
Objectif : Impact, en temps réel, des opérations de forage sur la qualité des eaux.
- 3. TOTAL III : du 24 au 28 mars 1996.**
Objectif : Impact des opérations de forage après fermeture du puits.

D'après la 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. Cependant, les prélèvements de décembre n'ont révélé aucun enrichissement des eaux en fer, ce, en raison de la différence de régime hydrologique. En effet, le fer, particulièrement abondant dans les sédiments de fond du bassin du Tuichi et de l'Arana, peut précipiter par réoxydation dans les eaux de surface ; en saison des pluies, en revanche, la dilution par les apports d'autres sous-bassins atténue le signal.

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.

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.

Les résultats des analyses en décembre n'ont pas révélé d'incidence des opérations de forage sur la minéralisation des eaux de surface des rivières avoisinant le site.

Cependant, **une contamination par le baryum des eaux de l'Arana et du Tuichi fut signalée en décembre.** Cette pollution, localisée dans l'espace puisque non perceptible dans les eaux du Béni, peut s'expliquer par un des produits utilisés, la baryte, largement employée dans les boues de forage.

Selon la même procédure que celle adoptée pour réaliser les campagnes précédentes, nous avons analysé les mêmes paramètres physico-chimiques et les mêmes métaux contenus dans les fractions dissoutes et particulières des eaux de surface.

Une troisième campagne de prélèvements a donc été organisée, du 24 au 28 mars 1996. Afin de comparer les résultats avec ceux obtenus lors des précédentes campagnes, les prélèvements ont été réalisés aux mêmes points, soit :

- 1 sur le rio Arana, en amont du point de rejet des eaux et des boues de forage,
- 1 dans le ruisseau à l'aval du puits,
- 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, à Angosto del Bala.

1 - RECUEIL DES DONNEES

1.1 Présentation de la troisième campagne de prélèvements

La troisième campagne de prélèvement a été réalisée du 24 au 28 mars 1996, soit un mois environ après l'arrêt des opérations de forage. En effet, la réalisation du premier objectif, c'est-à-dire atteindre 4000 m,

n'ayant donné aucun résultat, la poursuite des opérations s'est trouvée compromise faute de nouveaux investisseurs. Ainsi, le puits a été bouché début mars ; ont suivi le démontage du campement et le réaménagement du site, essentiellement afin de restaurer les essences végétales rares déboisées pour les besoins du chantier.

Nous avons commencé par échantillonner les rivières les plus proches du campement. Le premier prélèvement, T1, a été réalisé sur l'Arana, en amont du campement ; le second, T2, a été réalisé en contrebas aval du site de forage, dans un petit ruisseau qui alimente l'Arana. Le lendemain, les prélèvements T3 et T4 ont été réalisés sur 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 sur le rio Béni, en amont et en aval de la confluence avec le Tuichi ; le point aval, T6, est situé à Angosto del Bala, station hydrologique suivie par le SENAMHI et l'Orstom depuis 1967 et dont la courbe de calibration est satisfaisante.

Les six points de prélèvements sont présentés en figure 1.1.

Le débit estimé à partir de la hauteur d'eau relevée à Angosto del Bala est d'environ $1\ 800\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$, soit 1,6 fois supérieur à celui observé en mai 1995. 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 fin de saison des pluies, c'est-à-dire au début de la période de décrue.

Les éléments physico-chimiques et chimiques mesurés sur les échantillons d'eau sont les mêmes que pour les campagnes précédentes :

- **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 trois 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.

Les ions majeurs ainsi que tous les éléments métalliques de ces échantillons ont été analysés au Service Central d'Analyses du CNRS, à Vernaison, en 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 et de suffisamment de personnel pour respecter les échéances.

Lors de cette campagne, la température, la conductivité et le pH ont été suivis à l'aide de sondes (HASCH) *in situ*.

Les méthodes d'analyse utilisées sont rappelées 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
Chimiques Majeurs		
<i>Cations</i> CaO, MgO, K ₂ O, Na ₂ O	ICP-AES, Atomic Emission Spectrometry	Service Central d'Analyses du CNRS
<i>Anions</i> 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, Fe, Hg	ICP-MS, Inductively Conducted Plasma-Mass Spectrometry ICP-AES, Atomic Emission Spectrometry	Service Central d'Analyses du CNRS Service Central d'Analyses du CNRS

2 - LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Afin de déterminer l'impact éventuel des opérations de forage sur la qualité des eaux de surface des rivières du bassin, nous comparons les résultats obtenus au cours de chaque campagne en fonction des épisodes hydrologiques au cours desquelles ces dernières ont été réalisées.

L'ensemble des résultats des paramètres physico-chimiques obtenus avant, pendant et après les opérations de forage, sont présentés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Paramètres physico-chimiques obtenus dans les eaux de surface des rivières avoisinant le site Yariapo, du 24 au 28 mars 1996 (fin des opérations).

Ces résultats sont comparés à ceux obtenus aux mois de **décembre 1995 (pendant le forage)** et de **mai 1995 (avant l'installation du campement)**.

N°	Rio	Station	Position GPS	Date	Temp (°C)	pH	Cond. (µS/cm)	MES (mg/l)	m.o. (% MES)
T ₁	Arana amont	Campement TOTAL	S 14° 27' 43" W 67° 46' 45"	26/03/96	34,7	7,30	352	39	8,53
				18/12/95	30,2	7,85	339	110	4,20
				19/05/95	18	7,85	458	905	5,66
T ₂	ruisseau aval campement	Campement TOTAL	S 14° 28' 12" W 67° 46' 46"	26/03/96	28,5	7,36	500	27	52,43
				20/05/95	17	7,84	478	59	7,45
T ₃	Tuichi amont confl. Arana	Rurrenabaque	S 14° 29' 49.5" W 67° 48' 59.3"	27/03/96	21,9	6,36	30	532	2,06
				19/12/95	27,5	7,20	68	818	3,65
				20/05/95	19	7,39	510	135	6,55
T ₄	Tuichi aval confl. Arana	Rurrenabaque	S 14° 32' 07.1" W 67°45' 10.3 "	27/03/96	22,1	6,63	40	551	2,26
				19/12/95	28,0	7,13	69	695	4,90
				20/05/95	20	7,36		129	6,87
T ₅	Beni amont confl. Tuichi	Rurrenabaque	S 14° 35' 24.0" W 65° 31' 57.9"	27/03/96	24,7	6,88	80	1205	2,77
				19/12/95	28,8	7,13	99	930	5,13
				22/05/95	22	7,30	120	58	5,52
T ₆	Beni aval confl. Tuichi	Rurrenabaque	S 14° 31' 37.1" W 67° 29' 50.1"	27/03/96	24,3	6,54	70	1075	3,00
				19/12/95	29,1	7,07	83	779	4,44
				22/05/95	22	7,44	405	118	5,81

Sur le plan hydrologique, cette année a été particulièrement sèche en Bolivie, puisque le niveau des eaux mesuré en mars 1996 était inférieur à celui de mai 1995. Ces faibles profondeurs d'eau nous permettront d'interpréter de nombreux résultats, et en particulier les températures relativement élevées dans l'Arana.

2.1 La température

La température des eaux échantillonnées varie entre 22 et 35°C, dans les eaux de l'Arana, ce qui est relativement élevé. Ces fortes températures sont dues aux faibles profondeurs d'eau observées et à l'heure du prélèvement.

2.2 Le pH

Le pH a été mesuré sur site, dans un bêche, pour éviter tout processus de diffusion sur les électrodes. Les valeurs mesurées sur les échantillons d'eaux de rivière en mars dernier sont proches et neutres, puisqu'elles oscillent entre 6,6 et 7,3.

Comme à chaque campagne, les pH les plus alcalins ont été mesurés dans l'Arana et dans le ruisseau situés en aval du site, où ces valeurs sont à rapprocher du maximum de conductivité observé.

2.3 La conductivité

Les conductivités mesurées dans les rivières Tuichi et Béni sont bien moins élevées que celles observées en mai et décembre 1995, puisqu'elles varient de 30-40 µS cm⁻¹ dans le rio Tuichi à 70-80 µS cm⁻¹ dans le Béni pour atteindre 352 µS cm⁻¹ dans l'Arana (figure 2.1). Ces faibles valeurs de conductivités peuvent s'expliquer par le régime hydrologique où en fin de hautes eaux, en général, les eaux continentales sont moins concentrées en éléments ioniques.

Il apparaît clairement que les opérations de forage n'ont pas influencé les valeurs de conductivité des eaux de surface.

2.4 Les matières en suspension

Les matières en suspension (MES) mesurées en mars 1996 sur l'Arana sont de 39 mg l⁻¹, soit 3 fois plus faibles que celles qui avaient été obtenues en décembre et plus de 20 fois inférieures à celles de mai. Avant son absorption, 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 ». Cette diminution de la charge solide de l'Arana s'explique par le fait que d'une part, 1996 fut plus sèche que 1995, et d'autre part, que les prélèvements n'ont pas été réalisés après un épisode pluvieux.

En revanche, dans les eaux de surface des rios Béni et Tuichi, les teneurs en MES sont comprises entre 1100 et 1200 mg l⁻¹ ; ces valeurs maximales peuvent s'expliquer par l'épisode hydrologique puisque les prélèvements ont été réalisés en fin de saison des pluies, c'est-à-dire en fin de lessivage.

En comparant la charge turbide des eaux de surface de l'Arana, du Tuichi et du Béni, au cours des 3 campagnes, on peut observer une diminution régulière (figure 2.1) ce qui confirme le fait que **le transport solide de ces eaux est directement lié aux épisodes hydrologiques et n'a été en rien affecté par les opérations de forage et de rejets de boues.**

En effet, le ruisseau recueillant les boues de forage ne présentait pas, en décembre, un débit suffisant pour alimenter l'Arana. La charge turbide de ce ruisseau mesurée le 18 décembre 1995 bien que très élevée, 27 g MES l⁻¹, contenait en grande partie les boues de rejet du puits mais ces boues n'étaient pas encore diluées avec les eaux naturelles apportées par le ruissellement.

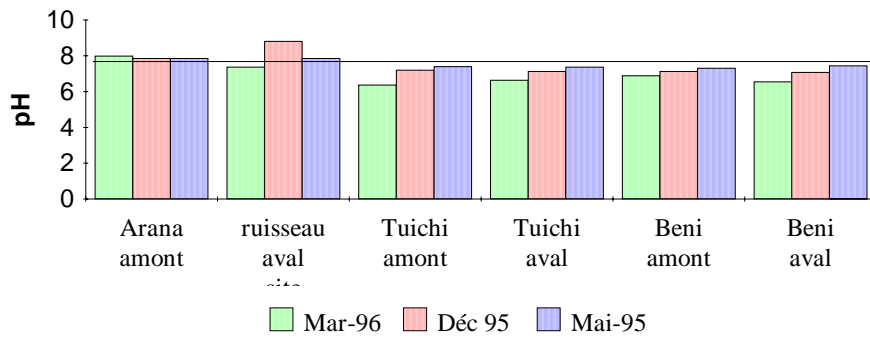
2.5 La matière organique particulière

La fraction organique du matériel en suspension contenu dans les eaux des rivières Béni et Tuichi est en moyenne, au cours des 3 campagnes, de $4,4 \pm 50$ % 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.

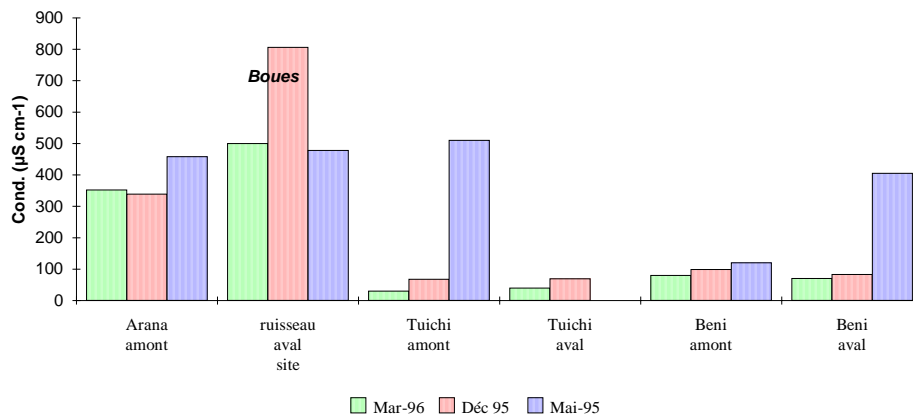
En revanche, dans le ruisseau recueillant les eaux de rejet du campement, la fraction organique particulière mesurée en mars 1996 est extrêmement importante puisqu'elle atteint 52 % des MES. Ce fort pourcentage s'explique par le fait, qu'à cette date, la fosse septique du camp ne devait pas fonctionner à son meilleur rendement, le ruisseau recueillant ainsi les eaux usées du campement, particulièrement riches en matière organique. Les fortes odeurs d'eaux usées s'échappant du ruisseau le jour du prélèvement, attestent cette hypothèse.

Figure 2.1. Evolution des paramètres physico-chimiques mesurés dans les eaux des rivières Arana, Tuichi et Béni, du 24 au 28 mars 1996, du 18 au 21 décembre 1995 et du 18 au 24 mai 1995.

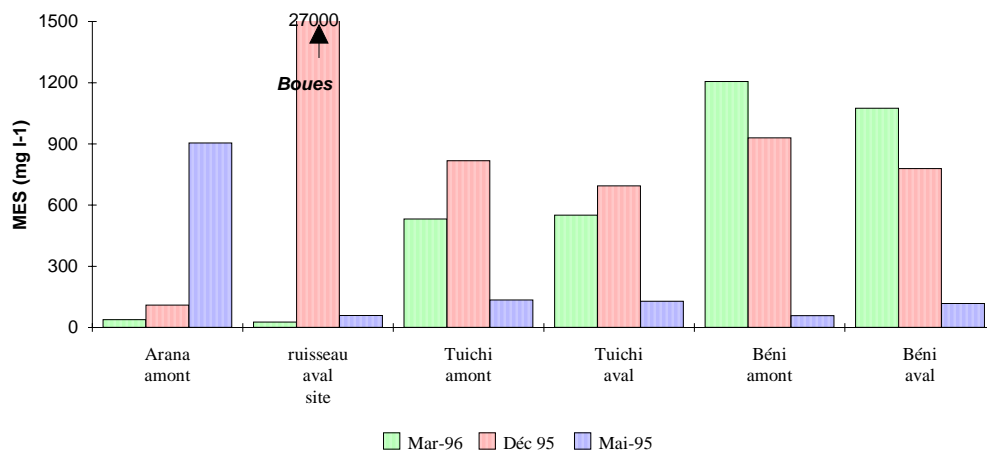
Evolution du pH au cours des 3 campagnes de prélèvements



Evolution de la conductivité au cours des 3 campagnes de prélèvements



Evolution des MES au cours des 3 campagnes de prélèvements



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 des deux premières campagnes, nous avons estimé pour chaque échantillon d'eau prélevée dans les rivières, 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 mars 1996, après les opérations de forage, sont comparés à ceux de mai et décembre 1995 (tableau 3.1).

Tableau 3.1. Concentrations en anions et cations majeurs analysés dans les eaux de rivière autour du site de forage du 24 au 28 mars 1996 (fin des opérations).

Ces résultats sont comparés à ceux obtenus dans les eaux de surface en décembre 1995 (pendant le forage) et en mai 1995 (avant les opérations).

Stations	Ca mg/l	Mg mg/l	K mg/l	Na mg/l	HCO_3 mg/l	Cl mg/l	NO_3 mg/l	SO_4 mg/l	SiO_2 mg/l	Cond $\mu\text{S}/\text{cm}$	pH
Arana amont	55,4	8,4	3,9	10,7	260	2,1	0,0	30,2	5,8	352	7,98
	58,4	9,4	5,2	13,7	256	2,0	7,6	42,0	6,3	339	7,85
	38,2	7,2	3,6	9,6	158	2,4	0,0	23,7	9,5	329	7,64
Ruisseau aval site <i>Boues</i> Ruisseau aval site	69,9	14,6	6,7	26,5	439	10,8	0,0	19,9	7,2	500	7,36
	2,8	0,3	1,3	2,8	18	1,7	0,0	2,1	1,0	806	8,80
	44,8	12,6	3,3	2,2	180	0,0	0,0	16,3	10,0	399	7,86
Tuichi amont	3,5	1,3	0,5	1,0	8	0,0	0,0	10,1	2,7	30	6,36
	7,9	2,0	0,9	1,8	35	0,4	0,2	9,8	3,5	68	7,20
	6,1	2,3	0,9	1,5	25	0,0	0,0	8,8	7,8	72	7,03
Tuichi aval	3,4	1,3	0,5	1,0	8	0,1	0,0	10,0	2,7	40	6,63
	8,1	2,2	0,9	1,8	36	0,5	0,2	9,9	3,4	69	7,13
	7,0	2,4	0,9	1,7	29	0,0	0,0	8,9	8,0	77	7,05
Béni amont	8,4	3,8	1,0	2,8	28	0,8	0,2	20,0	3,7	80	6,88
	9,8	3,7	1,1	3,2	35	1,1	0,5	22,0	4,0	99	7,13
	9,2	4,6	0,9	3,6	31	2,5	3,7	23,3	9,1	118	7,05
Béni aval	7,8	3,1	0,7	2,2	28	0,5	0,0	17,9	3,4	70	6,54
	9,6	3,3	1,15	2,9	37	0,9	0,4	18,0	3,9	83	7,07
	9,6	4,3	0,9	3,3	35	2,5	0,0	19,1	9,1	106	7,03
<i>Eau robinet</i>	56,9	9,1	5,4	13,2	255	4,5	4,4	35,0	6,0	382	7,25
<i>Eau puits</i>	91,7	12,9	3,3	3,7	527	0,0	0,0	1,2	9,1	512	6,54
<i>Eau fosse septique</i>	56,0	12,1	7,6	11,4	304	5,1	4,7	5,7	6,2	402	7,41
Valeur guide potabilité CE	100 à 150	30	12	20		25 à 200	25	25	20		
Valeurs max. admisses pour rejet	700					2500	100	8000			

Nous pouvons remarquer que, les boues de forage ont une minéralisation relativement faible comparativement à celles des eaux de l'Arana, ce qui n'est pas le cas des eaux du ruisseau en aval du site qui collecte les eaux usées du campement.

En revanche, l'évolution des sels majeurs au cours des 3 campagnes dans les eaux du Tuichi et du Béni peut s'interpréter par les variations des apports naturels et du régime hydrologique.

Les observations émises à l'issue des campagnes précédentes au sujet de la minéralisation des eaux de surface sont également vérifiées au cours de cette dernière campagne, sauf en ce qui concerne les eaux du Tuichi. En effet, ces dernières sont nettement moins minéralisées, leur conductivité est comprise entre 30 et 40 $\mu\text{S cm}^{-1}$, contre 70 $\mu\text{S cm}^{-1}$, en moyenne au cours des autres campagnes, et leur teneur en bicarbonates a été divisée en moyenne par 4 (figure 3.1). Leur faciès est plutôt sulfaté calcique. Cette année étant particulièrement sèche sur le plan hydrologique, la diminution de la minéralisation des eaux du Tuichi et particulièrement de sa charge cationique, peut s'expliquer par un lessivage et donc un apport en sels moins important en 1996 qu'en 1995.

En revanche, les eaux proches du site de forage et celles du Béni ont un faciès bicarbonaté sulfaté, ces rivières étant 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).

Dans les eaux de l'Arana, du ruisseau en aval du site et du Béni, 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 maxima a été mesurée dans les eaux du ruisseau en aval du site, en mars 1996, avec 70 mg l⁻¹, ce qui correspond à une augmentation de 55 % par rapport à la première analyse effectuée en mai 1995.

Les valeurs mesurées dans 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). En revanche, les teneurs mesurées dans les eaux du Tuichi au cours de la dernière campagne sont près de 2 fois plus faibles que les précédentes valeurs ce qui est en accord avec la faible minéralisation de ces eaux.

3.2 Le magnésium

Comme dans le cas du calcium, les concentrations maximales sont mesurées dans les eaux du ruisseau en aval du site et celles de l'Arana où elles atteignent respectivement 14,6 et 8,4 mg l⁻¹, tandis que dans le Tuichi et le Béni, elles sont respectivement en moyenne de 1,3 et de 3,45 mg l⁻¹, c'est-à-dire identiques à celles mesurées en mai et décembre sur ces rivières.

3.3 Le potassium

Comme pour les autres cations, la teneur en potassium maxima est observée en mars 1996 dans les eaux du ruisseau en aval du forage, soit 6,7 mg l⁻¹. Dans les eaux de l'Arana, en amont du campement, la concentration moyenne en potassium est de 4,2 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 mg l⁻¹ (Guyot, 1993), ce qui reste du même ordre de grandeur.

Comme dans le cas de tous les cations mesurés, les eaux du Tuichi présentent des concentrations en potassium près de 2 fois inférieures à celles des campagnes précédentes.

3.4 Le sodium

Les eaux du ruisseau en aval du campement présentent des teneurs en sodium particulièrement élevées en mars 1996 : 26,5 mg l⁻¹, contre 2,2 mg l⁻¹ en mai 1995. Cette forte augmentation ne se fait pas sentir dans les eaux du Tuichi et du Béni où, au contraire, c'est en mars 1996 que sont mesurées les concentrations en sodium les plus faibles.

En ce qui concerne les eaux des rivières échantillonnées, 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 trois campagnes, c'est-à-dire que **les opérations de forage n'ont pas eu d'influence sur les teneurs en cations des eaux de surface des rivières Tuichi et Béni.**

En revanche, **les concentrations en cations dans les eaux du ruisseau situé en aval du site présentent des teneurs très élevées et peuvent s'expliquer par les rejets d'eaux usées du campement.**

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, en mars 1996, respectivement 89 %, 44 % et 59 % de la charge anionique. **Dans les eaux du ruisseau situé à l'aval du site et comme indiqué précédemment, fortement minéralisé, la teneur en carbonates, avec 439 mg l⁻¹, atteint 93,5 % de la charge anionique.**

Ces bicarbonates peuvent provenir des effluents du campement ; la source naturelle résulte de l'échange du CO₂ entre l'atmosphère et l'eau, 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.

Pour chaque campagne, dans les eaux du Tuichi, les chlorures sont quasi-absents de la charge anionique. Dans les eaux du Béni, les teneurs sont, en moyenne sur les 3 campagnes, de $1,4 \pm 1,1 \text{ mg l}^{-1}$ et dans l'Arana, de $2,2 \pm 0,2 \text{ mg l}^{-1}$. On peut observer qu'il n'y a quasiment aucune différence dans les teneurs en chlorures des eaux de surface de l'Arana, du Tuichi et du Béni, entre les trois campagnes.

Cependant, la concentration en chlorures de **l'eau du ruisseau** varie de 0, en mai 1995, à $10,8 \text{ mg l}^{-1}$, en mars 1996. Cette **forte augmentation peut s'expliquer par les eaux de rejet du campement**, probablement riches en sels (cuisine, etc ...).

3.7 Les nitrates

Les teneurs en nitrates analysées dans les eaux de l'Arana, du ruisseau, du Tuichi et du Béni sont quasi-nulles au cours de toutes les campagnes, donc négligeables dans la charge anionique.

La seule valeur élevée a été mesurée en décembre 1995, dans les eaux de l'Arana avec une teneur en nitrates non négligeable, de $7,6 \text{ mg l}^{-1}$.

Le campement n'a donc pas affecté la teneur en nitrates des eaux avoisinant le site.

3.8 Les sulfates

Les opérations de forage et le campement établi par TOTAL n'affectent pas les teneurs en sulfates des eaux naturelles. En effet, ni les boues, ni les eaux de la fosse septique sont enrichies en sulfates, ainsi, les variations des concentrations en sulfates observées sur les rivières échantillonnées s'expliquent par les variations du régime hydrologique

Dans les eaux du Tuichi, la concentration moyenne mesurée au cours des 3 campagnes est de $9,6 \pm 0,5 \text{ mg l}^{-1}$, contre $20,0 \pm 3,3 \text{ mg l}^{-1}$ sur le Béni et $32 \pm 10 \text{ mg l}^{-1}$ sur l'Arana. La moyenne obtenue sur le Béni, à Angosto del Bala, est légèrement plus élevée que la moyenne interannuelle mesurée entre 1983 et 1991 de $12,3 \text{ mg l}^{-1}$ (Guyot, 1993). Ces sulfates peuvent provenir de l'oxydation des sulfures métalliques contenus dans les sols.

3.9 La silice

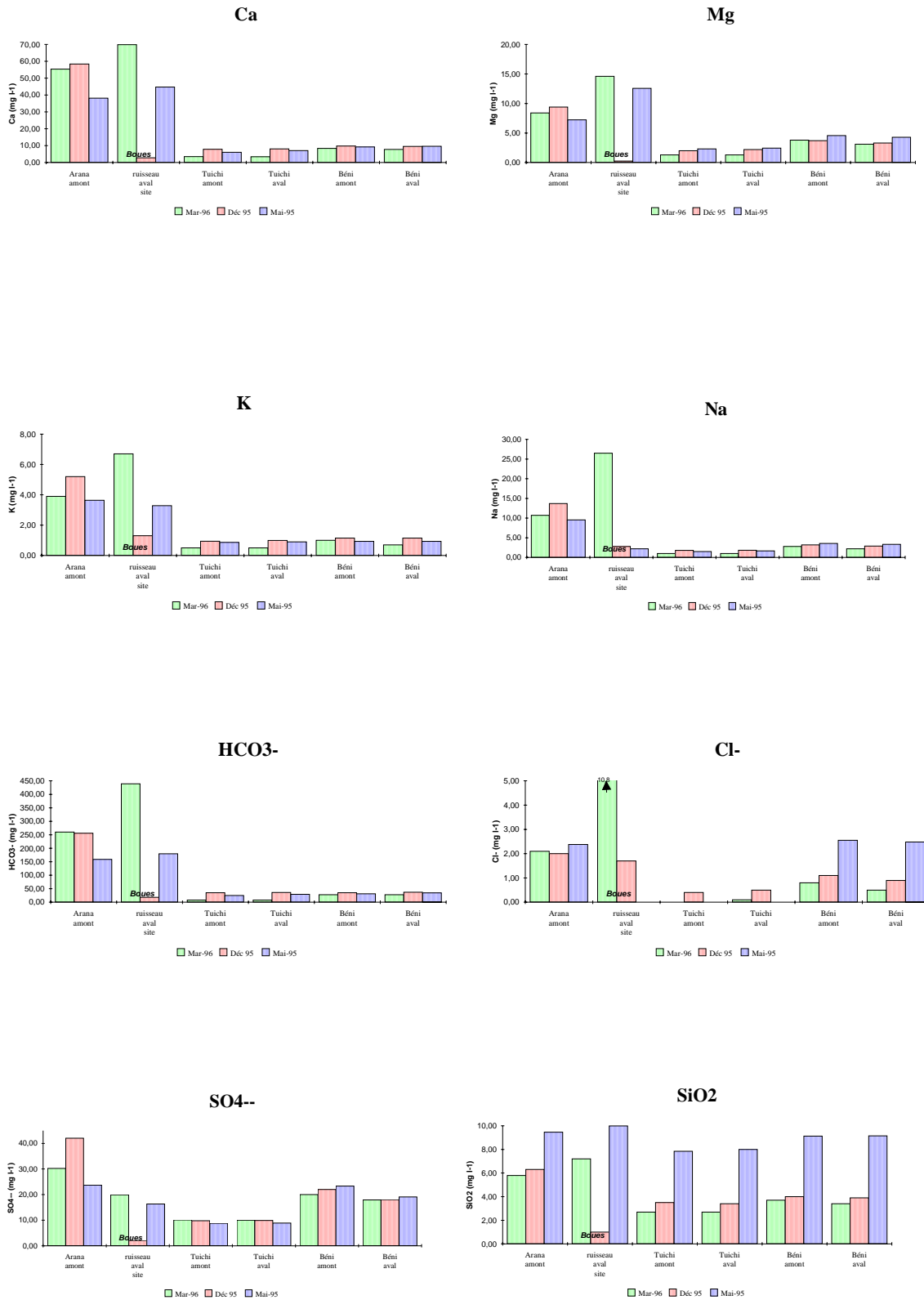
On peut observer sur chaque rivière échantillonnée, une diminution des teneurs en silice entre les 3 campagnes, ce, y compris sur le ruisseau en aval du campement. Donc, **les opérations de forage, dans leur globalité, n'ont aucune incidence sur les teneurs en silice des eaux naturelles avoisinant le site.**

Dans les rivières échantillonnées, les concentrations en silice sont deux fois plus faibles en décembre qu'en mai.

La silice représente 5 à 10 % de la fraction dissoute dans les eaux de surface du Tuichi et du Béni. Dans les eaux du ruisseau, ce pourcentage tombe à 1,2 % et à 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, très faiblement minéralisées, n'ont pas d'influence sur la minéralisation des eaux du Tuichi et de l'Arana. En revanche, ce sont **les effluents du campement qui peuvent expliquer la très forte minéralisation mesurée dans les eaux du ruisseau** en aval du site, principalement en ce qui concerne les teneurs en calcium, sodium, bicarbonates, et chlorures.

Figure 3.1. Evolution des concentrations en sels majeures analysées dans les eaux des rivières Arana, Tuichi et Béni, du 24 au 28 mars 1996, du 18 au 21 décembre 1995 et du 18 au 24 mai 1995.



4 - LES ELEMENTS METALLIQUES

Les 11 éléments métalliques retenus dans notre étude sur la contamination éventuelles des eaux autour du site de forage sont les mêmes 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 dernière étude avec les précédents, ainsi que l'analyse des boues de rejet du forage, vont nous permettre de vérifier si oui ou non les opérations de forage ont modifié 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.

En général, les teneurs sont plus élevées sur la fraction particulaire principalement en raison du processus d'adsorption des éléments métalliques sur les particules.

Les teneurs mesurées en mars 1996, en décembre 1995 et mai 1995 sont présentées dans le tableau 5.1 et tracées en figure 5.1. Pour les éléments suivants : **arsenic, cadmium, cuivre, chrome, plomb, sélénium et zinc**, la plupart des 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 ce qui concerne les résultats de mars 1996, l'augmentation de certaines teneurs en métaux sur le Béni s'explique généralement par la **plus forte concentration de ces eaux en matériel en suspension**. C'est également le cas pour les boues de forage analysés en décembre 1995 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**.

Les trois points de référence non affectés par les boues de forage sont T1, l'Arana en amont du campement et du puits, T3, le Tuichi en amont de sa confluence avec l'Arana, et T5. Les différences observées en ces points de référence entre les différentes campagnes s'expliquent essentiellement par l'évolution temporelle du régime hydrologique.

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 24 au 28 mars 1996 (fin des opérations).

Ces résultats sont comparés à ceux des mois de décembre 1995 (pendant le forage) et de mai 1995 (avant la mise en place du chantier).

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	13,37	173,85	8,36	1,00	193,91	36,78	36,78	6,69	180,53	0,84	< 0,17
		2,91	2496,9	53,33	0,48	41,21	36,36	18,18	2,42	84,85	2,42	< 0,12
		2,21	128,18	2,21	0,09	26,52	8,84	8,84	0,44	30,94	12,82	
T2	Aval site	10,07	1591,5	100,73	3,02	110,80	56,41	30,22	20,15	271,96	28,20	< 5,04
		13,56	203,39	33,90	1,36	135,59	16,95	14,92	6,78	61,02	18,64	< 1,24
T3	Tuichi amont	8,54	96,29	5,46	0,14	54,63	17,76	25,27	1,37	78,53	24,24	< 0,34
		1,30	150,77	1,02	0,08	12,63	11,41	15,48	0,41	52,97	16,95	< 0,20
		3,56	118,52	23,70	0,59	47,41	8,89	13,33	2,96	118,52	17,48	
T4	Tuichi aval	8,95	79,49	6,26	0,13	18,15	14,40	23,16	1,25	68,23	18,53	< 0,31
		1,60	154,54	74,61	0,11	17,05	14,39	17,59	0,53	69,81	19,18	< 0,27
		3,10	34,11	15,50	0,62	37,21	4,65	11,47	3,10	155,04	11,78	
T5	Béni amont	14,17	110,38	3,02	0,39	38,00	12,97	29,55	0,30	126,66	24,31	< 0,15
		5,97	127,44	17,92	0,32	17,12	11,95	21,11	0,40	99,56	20,59	< 0,20
		20,69	124,14	34,48	1,38	82,76	17,24	29,66	6,90	68,97	42,76	
T6	Béni aval	13,44	111,96	1,03	0,45	39,62	15,85	29,63	0,69	137,80	26,80	< 0,17
		5,92	162,93	3,70	0,30	20,24	17,77	24,69	0,49	110,60	28,73	< 0,25
		10,17	101,69	23,73	0,68	54,24	13,56	16,95	3,39	50,85	19,32	

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	280	25	0,2	< 2	5	< 1	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	310	13	< 0,5	< 2	9	< 2	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	260	< 5	< 0,5	5	< 2	< 2	< 2	26	12	0,105
T2	Aval site	15	260	14	0,2	< 2	7	< 1	< 2	< 2	90	< 1
		< 2	398	< 5	< 0,5	2,5	< 2	< 2	< 2	4	17	0,099
T3	Tuichi amont	2	8	7	0,2	< 2	< 2	< 1	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	43	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	62	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	27	54	0,088
T4	Tuichi aval	2	8	5	0,2	< 2	< 2	< 1	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	44	7	< 0,5	< 2	3	< 2	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	77	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	22	323	0,091
T5	Béni amont	2	10	38	0,2	< 2	< 2	< 1	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	20	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	25	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	8	26	0,083
T6	Béni aval	3	10	11	0,2	< 2	< 2	< 1	5	8	< 10	< 1
		< 2	28	9	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 10	< 1
		< 2	39	< 5	< 0,5	< 2	< 2	< 2	< 2	10	69	0,1

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	2,52	286,80	25,33	0,24	9,58	6,44	2,44	2,26	9,06	0,04	< 1,01
		2,32	584,67	18,87	0,55	6,53	13,00	4,00	2,27	11,33	0,28	< 1,01
		4,00	376,00	7,00	0,58	29,00	10,00	10,00	2,40	54,00	11,61	
T2	Aval site Boues	15,27	303,29	16,74	0,28	5,01	8,53	1,82	2,55	9,40	0,86	< 1,14
		68,67	328203	171,67	13,83	568,7	1408,0	953,33	68,67	3468,7	1220	< 34,33
		2,80	410,00	7,00	0,58	10,50	3,00	2,88	2,40	7,60	1,12	
T3	Tuichi amont	6,55	59,27	9,91	0,27	31,09	11,45	14,45	2,73	43,82	12,92	< 1,18
		3,07	166,33	5,83	0,57	12,33	11,33	14,67	2,33	45,33	13,88	< 1,17
		2,48	78,00	8,20	0,58	8,40	3,20	3,80	2,40	43,00	2,41	
T4	Tuichi aval	6,93	51,79	8,45	0,27	12,00	9,93	13,76	2,69	39,59	10,22	< 1,17
		3,11	151,41	58,85	0,57	13,85	13,00	14,22	2,37	50,52	13,34	< 1,19
		2,40	81,40	7,00	0,58	6,80	2,60	3,48	2,40	42,00	1,84	
T5	Béni amont	19,09	143,09	41,64	0,67	47,82	17,64	36,64	2,36	154,73	29,32	< 1,18
		7,56	138,52	21,67	0,80	17,93	13,11	21,63	2,37	94,59	19,16	< 1,19
		3,20	32,20	7,00	0,58	6,80	3,00	3,72	2,40	12,00	2,51	
T6	Béni aval	17,44	130,37	12,11	0,68	44,59	19,04	32,85	5,74	156,15	28,82	< 1,19
		6,62	154,92	11,88	0,73	17,77	15,85	21,23	2,38	88,15	22,39	< 1,19
		3,20	51,00	7,80	0,58	8,40	3,60	4,00	2,40	16,00	2,35	
Seuil rejet		1000	1000	5000	1000	5000	5000	2000	500	15000	10	50

5.1 L'arsenic

Pour les 3 campagnes, les teneurs en arsenic dans la fraction dissoute restent inférieures à 2 µg l⁻¹.

Dans la fraction particulaire en revanche, ces teneurs sont naturellement en augmentation par rapport aux résultats de décembre et mai 95. Dans les eaux du Tuichi et du Béni, ces teneurs, de 8 à 14 µg g⁻¹, sont 2 à 3 fois plus importantes que celles mesurées en mai. Au total, les teneurs en arsenic dans les eaux de rivière sont comprises entre 2 µg l⁻¹ dans l'Arana, et 19 µg l⁻¹, dans le Béni, ce qui reste largement inférieur aux valeurs maximales admises pour les rejets en Bolivie, de 1 mg.l⁻¹.

Comme nous l'avons observé par l'analyse des résultats de décembre, **les rejets des boues de forage n'entraînent aucune contamination des eaux par l'arsenic ; l'augmentation des teneurs en mars dans les eaux du Tuichi et du Béni est d'origine naturelle.**

5.2 Le baryum

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

Cette contamination est due à l'utilisation de la baryte en grande quantité, puisqu'elle représente 50 % du tonnage total des produits chimiques utilisés pour réaliser ces boues.

En effet, la teneur mesurée dans les boues s'élève à 330 mg l⁻¹, ce qui dépasse plus de 300 fois la limite de rejet proposée en Bolivie.

Pendant et après les opérations de forage, les teneurs obtenues dans les eaux de l'Arana et du ruisseau en aval du site, sont relativement élevées aussi bien dans la fraction dissoute que particulaire ; leur teneur totale s'élève à 400 µg l⁻¹ en moyenne contre 60 µg l⁻¹ en moyenne, dans les eaux du Tuichi et du Béni, avant les opérations 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 µg l⁻¹.

D'après les résultats obtenus *au cours du forage, la contamination par le baryum est perceptible dans les eaux du Tuichi à l'aval de sa confluence avec l'Arana, ainsi que dans les eaux du Béni*, où les teneurs mesurées dans les fractions particulaires augmentent d'environ 30 % entre l'amont et l'aval de la confluence avec le Tuichi.

Cependant, **après la fermeture du puits, cette pollution n'est plus perceptible** puisqu'il n'y a pas d'augmentation significative des concentrations en baryum de part et d'autre de la confluence avec l'Arana (figure 5.1).

5.3 Le bore

Nous avons observé que l'influence des boues de forage sur cet élément dans les eaux du Tuichi n'est pas négligeable. Entre les 2 premières campagnes, ces teneurs passaient 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.

Après la fermeture du puits, les teneurs en bore restent élevées dans le ruisseau à l'aval du site, particulièrement sur le matériel particulaire, avec 100 $\mu\text{g B g}^{-1}$, mais cette contamination n'est plus perceptible sur les plus grandes rivières, soit le Tuichi et le Béni.

5.4 Le cadmium

Nous avons pu observer que, malgré les teneurs élevées de cadmium mesurées dans les boues, aucune contamination n'avait été mesurée dans les eaux de surface.

Cependant, même **après la fermeture du puits, de très importantes concentrations en Cd ont été mesurées dans le ruisseau en contrebas du site**, en particulier dans la fraction particulaire (3 $\mu\text{g g}^{-1}$). Or, le cadmium est connu pour ses affinités avec la matière organique, particulièrement abondante dans ce ruisseau. Mais en raison de sa faible charge particulaire, cette pollution reste faible.

Plus en aval, les opérations de forage n'ont pas entraîné de contamination en cadmium dans les eaux du Tuichi et du Béni.

Dans les eaux de surface du Tuichi, les valeurs obtenues en mars 96 sont deux fois plus faibles que celles de mai et décembre, soit 0,27 $\mu\text{g l}^{-1}$; les teneurs mesurées dans le Béni restent dans la moyenne de celles mesurées au cours des 2 campagnes précédentes, soit $0,67 \pm 0,01 \mu\text{g l}^{-1}$.

5.5 Le cuivre

Nous avons pu observer une augmentation de 35 % des teneurs en cuivre particulaire du Tuichi, de part et d'autre de sa confluence avec l'Arana mais sans dépasser les valeurs mesurées en mai.

L'augmentation générale des teneurs en cuivre dans les eaux du Tuichi et du Béni s'explique par un apport naturel dû au lessivage du bassin versant, particulièrement riche, et à une plus faible dilution des eaux de surface, l'année hydrologique 1996 étant particulièrement sèche.

Le rejet des boues de forage n'a aucune incidence sur la qualité en cuivre des eaux de surface.

5.6 Le chrome

Nous rappelons que le chrome contenu dans les boues de forage atteignait 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 5 mg l^{-1} .

Comme pour le cadmium, les teneurs en chrome particulaire mesurées dans le ruisseau recueillant les eaux de rejet du camp sont particulièrement élevées, puisqu'elles atteignent 56 $\mu\text{g g}^{-1}$, soit 3 fois leur valeur naturelle mesurée en mai.

Une contamination par le chrome des eaux du ruisseau en aval du site est donc à signaler.

Mais les analyses effectuées après la fermeture du puits confirment le fait qu'il n'y a pas d'influence significative des opérations de forage sur les teneurs en chrome dans les eaux de surface des rivières Tuichi et Béni, ce, en comparaison avec l'influence du régime hydrologique.

5.7 Le plomb

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

Nous avons mesuré en décembre 1995 que les boues de forage présentaient des teneurs en plomb de 35 $\mu\text{g g}^{-1}$, ce qui est plus de 2 fois plus élevé que la concentration naturelle dans les eaux du ruisseau où étaient rejetées ces boues.

Les analyses réalisées après la fermeture du puits révèlent clairement que **les particules des eaux du ruisseau sont contaminées** puisque leur teneur en plomb est de 56 $\mu\text{g g}^{-1}$ contre 17 $\mu\text{g g}^{-1}$ avant les travaux de forage.

En revanche, **cette contamination n'est plus détectable ni dans les eaux du Tuichi, ni du Béni** puisque les différences de concentrations en plomb de part et d'autre des confluences ne sont pas significatives.

5.8 Le sélénium

Le rejet dans le ruisseau situé en contrebas du site des boues de forage dont les concentrations en sélénium, $69 \mu\text{g l}^{-1}$, dépassaient 6 fois la valeur limite de rejet adoptée en Bolivie, **induit une contamination de ces eaux même un mois après la fermeture du puits.**

En revanche, ces rejets n'induisent aucune contamination des eaux de surface des rivières Tuichi et Béni.

Les concentrations en sélénium mesurées dans les eaux de surface de l'Arana, du Tuichi et du Béni sont stables, toutes situées dans une même gamme de valeur, et égales à $2,47 \pm 0,2 \mu\text{g l}^{-1}$, sauf pour les eaux du Béni en amont du Tuichi où la teneur dans la fraction dissoute atteint $5 \mu\text{g l}^{-1}$.

5.9 Le zinc

Nous avons pu remarquer à partir des résultats de décembre 1995, que les concentrations en zinc mesurées dans les boues de forage sont importantes puisqu'elles atteignent $130 \mu\text{g g}^{-1}$, soit 2 fois la teneur des particules du ruisseau où sont rejetées ces boues, ce qui représente, étant donné leur forte charge particulaire, une teneur totale de $3,5 \text{ mg l}^{-1}$ contre $7 \mu\text{g l}^{-1}$ naturellement pour les eaux de ce même ruisseau.

En décembre, l'influence de la contamination de l'Arana en zinc n'était pas négligeable dans les eaux du Tuichi dont la teneur en zinc de ses particules augmentaient de 32 %.

En revanche, cette contamination n'est plus décelable après la fermeture du puits, ni dans les eaux du Tuichi, ni dans celles du Béni.

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

5.10 Le fer

Comme nous avons pu l'observer au cours de l'établissement de l'état zéro de la qualité des eaux, 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 les apports et la turbulence sont plus élevés.

Les conclusions émises lors de la comparaison des résultats des 2 premières campagnes sont confirmées par les résultats des analyses réalisées après la fermeture du puits.

Ainsi le régime hydrologique (saison des pluies) et la nature du bassin versant traversé, particulièrement riche en fer, explique l'évolution temporelle des teneurs en fer mesurées dans les eaux de l'Arana, du Tuichi et du Béni.

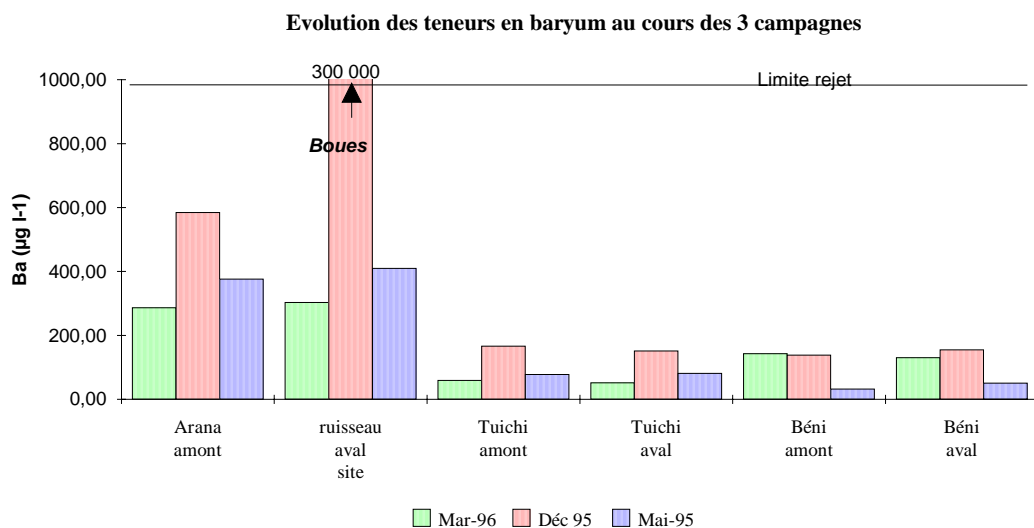
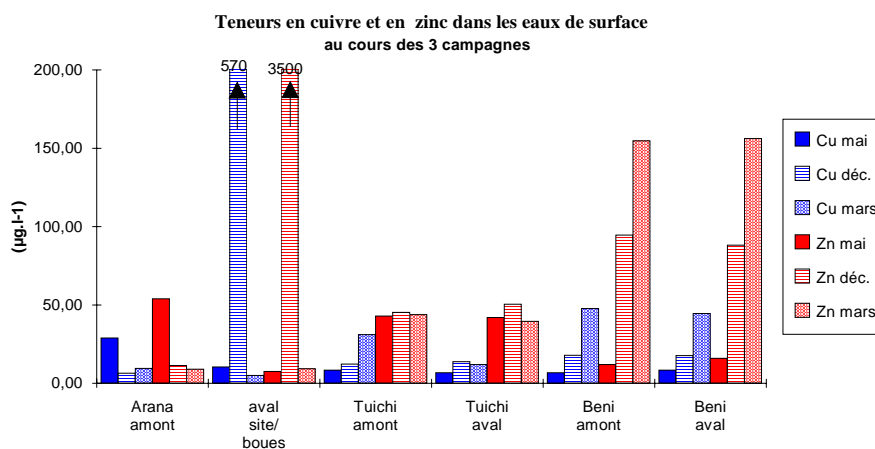
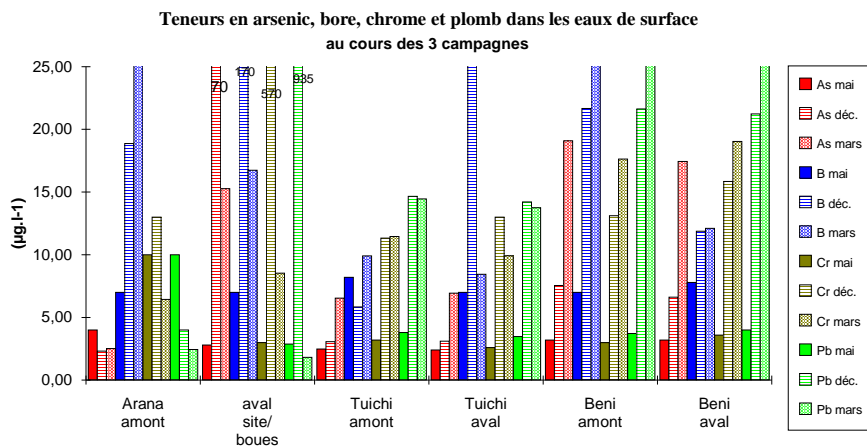
5.11 Le mercure

On aurait pu craindre une contamination des eaux en mercure dans un bassin versant où les activités de recherche d'or alluvial sont particulièrement développées. Or, aucune des analyses réalisées n'a révélé de concentrations inquiétantes. De toute façon, aucune contamination en mercure n'a été mesurée dans les boues de forage où la valeur maximale était 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 inférieur à $2 \mu\text{g l}^{-1}$.

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 et des eaux de la fosse septique, avant, pendant, et après les 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, et la dernière campagne en fin de saison des pluies. L'étude de la qualité de ces eaux a été menée à partir de l'analyse des principaux éléments 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, les boues de forage ont une minéralisation relativement faible comparativement à celles des eaux de l'Arana et du ruisseau situé en aval du site, **ce qui n'est pas le cas des eaux du ruisseau en aval du site qui collecte les eaux usées du campement, même après fermeture du puits.**

L'évolution des sels majeurs au cours des 3 campagnes dans les eaux du Tuichi et du Béni peut s'interpréter par les variations des apports naturels et du régime hydrologique. Les observations émises à l'issue des campagnes précédentes au sujet de la minéralisation des eaux de surface sont également vérifiées au cours de cette dernière campagne, sauf en ce qui concerne les eaux du **Tuichi**. En effet, ces dernières sont nettement moins minéralisées, leur conductivité est comprise entre 30 et 40 $\mu\text{S cm}^{-1}$, contre 70 $\mu\text{S cm}^{-1}$, en moyenne au cours des autres campagnes, et leur teneur en bicarbonates a été divisée en moyenne par 4. Leur faciès est plutôt sulfaté calcique. Cette année étant particulièrement sèche sur le plan hydrologique, la diminution de la minéralisation des eaux du Tuichi et particulièrement de sa charge cationique, peut s'expliquer par un lessivage et donc un apport en sels moins important en 1996 qu'en 1995. En revanche, les eaux proches du site de forage et celles du Béni ont un faciès bicarbonaté sulfaté, ces rivières étant 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).

L'eau du robinet, en décembre 1995, 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 modifiait peu leur minéralisation.

Si les opérations de forage, en décembre, n'avaient pas d'influence sur les teneurs en cations des eaux de surface des rivières avoisinant le site, en revanche, les effluents du campement enrichissent considérablement les eaux du ruisseau situé à l'aval en calcium, sodium, bicarbonates et chlorures principalement.

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 rendait, en décembre 1995, les eaux de l'Arana impropres à la consommation, en référence au niveau guide imposé par la Directive des Communautés Européennes, de 100 $\mu\text{g l}^{-1}$. D'après les résultats obtenus au cours des opérations de forage, **cette contamination était encore perceptible dans les eaux du Tuichi à l'aval de sa confluence avec l'Arana, en décembre 1995, mais, en revanche, un mois après la fermeture du puits, cette pollution n'était alors plus sensible.** La contamination des eaux de surface par le baryum n'a jamais été perceptible dans les eaux du Béni.

Les analyses réalisées dans les eaux du ruisseau situé en contrebas du site après sa fermeture révèlent des teneurs en certains métaux élevées à très élevées. Les métaux contaminant préférentiellement le matériel particulaire sont par ordre décroissant : **le baryum, le chrome, le fer, le plomb et le zinc**. La contamination métallique du ruisseau en aval du campement n'a aucune incidence sur les concentrations naturelles des eaux de surface des rivières Tuichi et Béni.

En conclusion, les seules eaux naturelles influencées par les opérations de forage sont les eaux du ruisseau situé à l'aval du campement. En effet, elles présentent un fort taux de minéralisation, dû aux rejets des effluents du campement. Mais le point le plus critique concerne la contamination des eaux par le baryum due à l'utilisation au cours des opérations de forage de produits comme la baryte (298 tonnes ont été utilisées au total). La contamination des eaux de ce ruisseau ne se fait pas sentir en aval, sur le Tuichi et a fortiori, sur le 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.