

Les flux de matières dissoutes et particulaires exportés des Andes par le Rio Béni (Amazonie Bolivienne), en période de crue

Dissolved and suspended sediment loads exported from the Andes by the Beni river (Bolivian Amazonia), during a Flood

par Jean-Loup GUYOT¹, Jean-Marie JOUANNEAU², Jorge QUINTANILLA³, Jean-Gabriel WASSON⁴

RÉSUMÉ. — Le Rio Béni est l'un des principaux formateurs andins du Rio Madeira, le plus important des affluents méridionaux de l'Amazone. La station hydrométrique de "Angosto del Bala" sur le Rio Béni contrôle un bassin andin de 67500 km², aux caractéristiques géomorpho-climatiques très contrastées.

Afin de connaître l'évolution temporelle des teneurs relatives des éléments des phases dissoutes et particulaires, un suivi hydrologique et hydrogéochimique a été réalisé à cette station en mars 1988, période de hautes eaux où une crue de fréquence annuelle a été observée. Les résultats obtenus montrent l'existence d'une grande variabilité temporelle des concentrations, mais présentant un cortège hydrogéochimique stable au cours de la crue.

Enfin, l'importance quantitative de cette période de hautes eaux sur le bilan moyen annuel des flux exportés est souligné.

Mots-Clés : Andes, Amazonie, Hydrologie, Matières en suspension, Hydrochimie, Géochimie.

ABSTRACT. — The Béni river, located in the Rio Madeira drainage basin (Figure 1), contributes significantly to the sediment exportation from the Andes to the Amazonian basin. Although most of transport takes place during floods, the nature of the load during high flow was poorly known.

To investigate this topic, an annual flood episode (10000 m³.s⁻¹) has been sampled near Rurrenabaque, at the "Angosto del Bala" PHICAB gauging station (Figure 1 and Table I) that controls the whole Andean catchment of the Béni river (67500 km²). This watershed presents highly contrasted geomorphic and climatic features, including some semi-arid sedimentary highly

erodible basins, and crystalline, hyperhumid, densely vegetated ones. Altitude is ranging from 6400 to 250 meters.

Gauging and sampling (Figures 3 & 4 and Table II) was carried out daily from March 15 to 30, 1988. Major elements (Tables III & V) and organic carbon (Table VII) were analysed in dissolved and suspended solids, clay mineralogy (Table IV) and trace elements (Table VI) in the suspended sediments.

Concentrations of Total Dissolved Solids (TDS) and Total Suspended Sediments (TSS) are highly variable (Figure 4) but linked together (Figure 5) as TDS and TSS probably come from the same basins. Inversely, the chemical composition of TDS as well as TSS is relatively stable during the sampled period. Almost 90% of organic carbon exported during this flood is particulate.

Corresponding budgets are calculated. Particulate material accounts for 99% of the total load. On an annual basis, this high flow episode (4% of the year time) may contribute to 30% of the Beni river mean annual sediment exportation to Amazonia.

Key-Words : Andes, Amazonia, Hydrology, Suspended Sediment, Water Chemistry, Geochemistry.

I. INTRODUCTION

Le fleuve Amazone apporte à l'océan Atlantique un débit de 209000 m³.s⁻¹ (Molinier, 1992) et des flux de matières dissoutes et particulaires estimés respective-

1. ORSTOM, CP 09747, 70001-970 Brasilia DF, Brésil. 2. IGBA, URA-CNRS 197, Université Bordeaux I, 351 Cours de la Libération, F-33405 Talence. 3. IIQ-UMSA, C.P. 303, La Paz, Bolivie. 4. CEMAGREF, Div. BEA, Lab. Hydroécologie quantitative, B.P. 220, F-69336 Lyon Cedex 09.

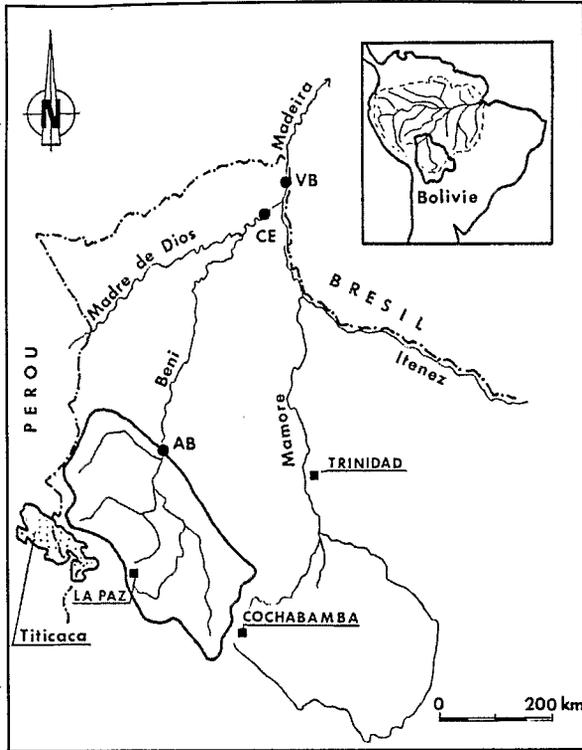


Figure 1: Carte de localisation du bassin versant étudié. AB : Rio Béni à Angosto del Bala, CE : Rio Béni à Cachuela Esperanza, VB : Rio Madeira à Villabella.

Figure 1: Drainage basin localization map. AB : Beni river at Angosto del Bala, CE : Beni river at Cachuela Esperanza, VB : Madeira river at Villabella.

ment à $290 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ (Gibbs, 1967) et $1200 \cdot 10^6 \text{ t.an}^{-1}$ (Meade *et al.*, 1979, 1985). L'essentiel des apports de matières provient des deux principaux tributaires andins de l'Amazone : les rios Marañón-Solimões et Madeira, issus des Andes du Pérou et de Bolivie. Jusqu'à présent, les apports des fleuves d'origine andine étaient connus seulement au niveau de leur confluence avec l'Amazone (Richey *et al.*, 1986).

La mise en route du programme PHICAB (1) en Amazonie bolivienne avait, entre autres objectifs, la connaissance des flux de matières dissoutes et particulaires des formateurs du Rio Madeira. Pour mener à bien cette étude, un réseau d'une quinzaine de stations hydrométriques a été installé en Bolivie, du piedmont andin jusqu'à la frontière boliviano-brésilienne (Abasto *et al.*, 1985). Un échantillonnage journalier et décadaire aux stations de ce réseau a permis d'estimer les flux globaux de matières dissoutes et particulaires dans ce vaste bassin de 903500 km^2 (Roche et Fernandez, 1988, Guyot *et al.*, 1988, 1989).

Afin d'être en mesure d'estimer les flux élémentaires exportés par ces bassins, il était indispensable de connaître l'évolution temporelle des teneurs relatives pour chaque élément, des phases dissoutes et particulaires. Ce travail expose les résultats obtenus sur le bassin andin du Rio Béni, l'un des principaux formateurs bolivien du Rio Madeira, lors d'un épisode de crue de fréquence annuelle (du 15 au 30 mars 1988).

II. LE BASSIN ETUDIÉ

Le Rio Béni à Angosto del Bala draine un bassin versant de 67500 km^2 , situé entre le $66^{\text{ème}}$ et le $69^{\text{ème}}$ degré de longitude Ouest, le $14^{\text{ème}}$ et le $18^{\text{ème}}$ degré de latitude Sud (Figure 1). Le relief de ce bassin tropical andin est très accentué, avec des altitudes voisines de 6400 mètres aux sommets de la cordillère orientale (Illampu, Illimani) et de 250 mètres à Rurrenabaque, situé à l'entrée de la plaine amazonienne (Espinoza, 1985).

Les différents sous-bassins drainés par le Rio Béni présentent des caractéristiques fortement contrastées (Barragan, 1990), depuis des formations sédimentaires quaternaires d'altitude dans la région de La Paz, extrêmement érodables, soumises à un climat froid et semi-aride (300 mm.an^{-1}), jusqu'à des massifs cristallins sous climat chaud et hyper-humide (4000 mm.an^{-1}) présentant un couvert végétal très dense (région des Yungas).

Conséquence du même régime pluviométrique d'origine atlantique (Roche *et al.*, 1990), tous les cours d'eau andins de Bolivie présentent un régime hydrologique comparable (Bourges *et al.*, 1990), caractérisé par une période de hautes eaux de janvier à mars (Figure 2).

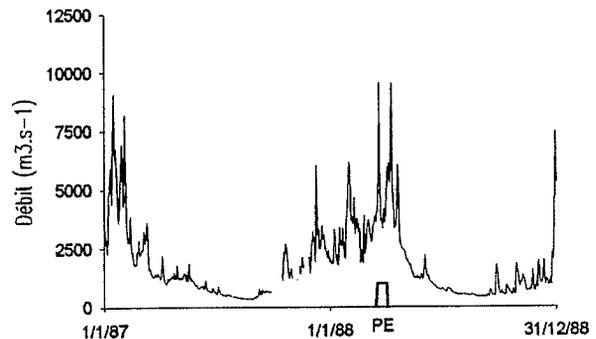


Figure 2: Débits du Rio Béni à Angosto del Bala, du 01/01/87 au 31/12/88. PE : période d'étude (du 15 au 30/03/88).

Figure 2: Beni river discharge at Angosto del Bala station, from 01/01/87 to 31/12/88. PE : study period (from March 15 to 30, 1988).

(1) Programme Climatologique et Hydrologique du Bassin Versant Amazonien de Bolivie (ORSTOM, SENAMHI, UMSA).

LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES EXPORTES DES ANDES PAR LE RIO BENI

Station	Superficie		Débit				MD			MES				
	km ²	%	Ref.	m ³ /s	%	%	Ref.	10 ⁶ /an	%	%	Ref.	10 ⁶ /an	%	%
Amazone à l'embouchure	6112000	100	(a)	209000	100		(c)	290	100		(e)	1200	100	
Rio Madeira à l'embouchure	1420000	23	(a)	31200	15		(d)	45	16		(d)	500	42	
Rio Madeira à Villabella	903500	15	(b)	17000	8	100	(b)	40	14	100	(b)	230	19	100
Rio Beni à Cachuela Esperanza	282500	5	(b)	8920	4	52	(b)	21	7	53	(b)	161	13	70
Rio Beni à Angosto del Bala	67500	1	(b)	2050	1	12	(b)	5	2	13	(b)	165	14	72

Tableau I: Contribution du Rio Béni à l'hydrologie du Rio Madeira et de l'Amazone (MD = matières dissoutes, MES = matières en suspension), d'après (a)=Molinier (1992), (b)=Guyot (1992), (c)=Gibbs (1967), (d)=Ferreira *et al.* (1988), (e)=Meade *et al.* (1985).

Table I: Béni river contribution to the Madeira and Amazon rivers hydrology (MD=TDS, MES=TSS), from (a)=Molinier (1992), (b)=Guyot (1992), (c)=Gibbs (1967), (d)=Ferreira *et al.* (1988), (e)=Meade *et al.* (1985).

Date	Débit m ³ /s	Cond. Moy. Section uS/cm	C.V. Section	Turb. Moy. Section F.T.U.	C.V. Section
16/3/88 am	4630	198	0.04	4893	0.15
17/3/88 am	6060	166	0.03	3898	0.05
19/3/88 am	6420	173	0.03	4144	0.07
19/3/88 pm	5520	187	0.02	4917	0.09
21/3/88 am	3710	148	0.02	1988	0.10
21/3/88 pm	3760	146	0.02	2108	0.10
23/3/88 am	3950	142	0.02	1910	0.05
23/3/88 pm	3640	147	0.03	2100	0.04
24/3/88 pm	3290	170	0.02	2487	0.05
25/3/88 am	4690	150	0.01	1931	0.05
25/3/88 pm	4320	155	0.02	2604	0.04
26/3/88 am	3760	142	0.02	1948	0.09
26/3/88 pm	3520	153	0.03	2487	0.10
27/3/88 am	3710	143	0.03	1827	0.11
29/3/88 am	4220	164	0.02	4117	0.08
29/3/88 pm	4320	164	0.02	4038	0.08
30/3/88 am	5880	137	0.04	2645	0.08
Moyenne	4435	158		2944	
C.V.	0.22	0.11		0.38	

Tableau II: Distribution des conductivités et turbidités moyennes dans la section de jaugeage, Rio Béni à Angosto del Bala (C.V.: coef. de variation=écart type/moyenne).

Table II: Mean conductivity and turbidity distribution in the gauging section, Béni river at angosto del Bala (C.V.: variation coef.=standart deviation/mean).

Les valeurs moyennes obtenues à la station du PHICAB de "Angosto del Bala", située une dizaine de kilomètres à l'amont de Rurrenabaque, pour la période d'observation 1983-1989, sont résumées dans le tableau I. A cette station, le Rio béni contribue respectivement pour 12, 13 et 72 % aux flux liquides, en solution et en suspension du Rio Madeira à Villabella. Ce dernier pourcentage est une valeur théorique, car près de la moitié du matériel particulaire va se déposer dans la plaine amazonienne et n'atteindra donc pas la station de Villabella (Guyot, 1992). L'écart observé entre les flux de matières particulaires des Rio Madeira à Villabella et à la confluence avec l'Amazone (Ferreira *et al.*, 1988) provient vraisemblablement des modes et fréquence d'échantillonnage différents pour des périodes de mesure également différentes.

III. MÉTHODES

Du 15 au 30 Mars 1988, 17 jaugeages ont été réalisés par mesure point par point des champs de vitesses au moulinet, sur le Rio Béni à Angosto del Bala, à partir d'une pirogue. Les mesures ont été effectuées sur une dizaine de points par verticale, et sur une douzaine de verticales par jaugeage. La profondeur maximum de la section a varié de 8 à 10 mètres, pour un maximum de vitesse moyenne sur la verticale de 4 m.s⁻¹ et une largeur moyenne de 350 mètres. Les teneurs en matières dissoutes et en suspension, prélevées à l'aide d'un échantillonneur intégrateur à ouverture horizontale sur les différentes verticales, sont assez homogènes, traduisant un assez bon brassage des eaux sur la section de mesure. La variabilité temporelle de la conductivité et de la turbidité est plus élevée que la variabilité dans la

section de mesure à un instant donné (Figure 3 & Tableau II).

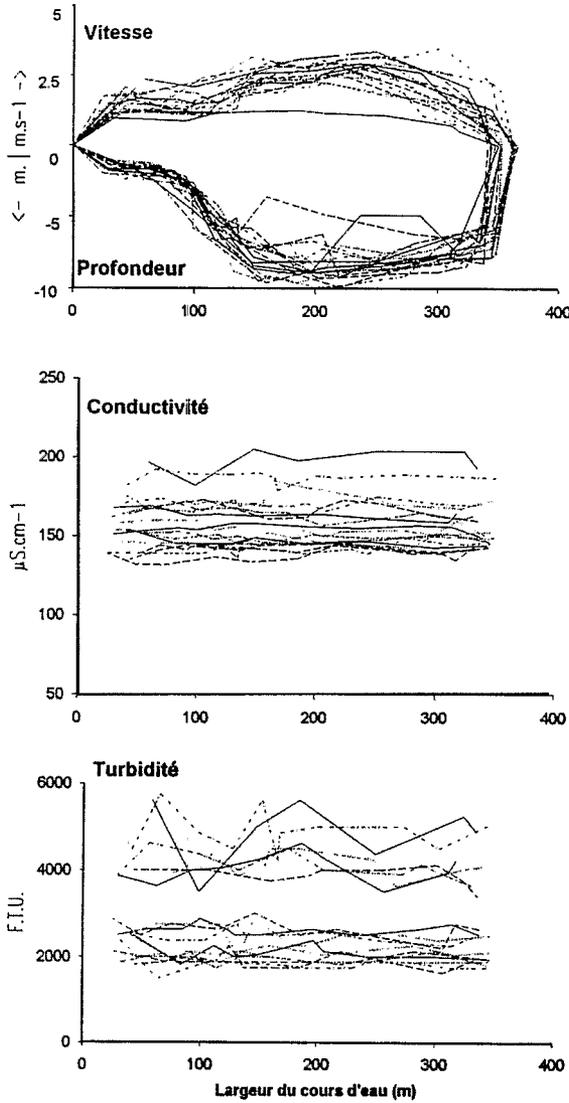


Figure 3: Résultats des jaugeages effectués du 15 au 30 mars 1988 sur le Rio Béni à Angosto del Bala.

Figure 3: Results of gaugings carried out from March 15 to 30, 1988, on the Béni river at Angosto del Bala.

Pour la même période, des prélèvements journaliers (10l.) ont été effectués en surface et au centre de la section de jaugeage. Les mesures de température, conductivité électrique et pH ont été réalisées *in situ*.

La détermination des MES a été réalisée au laboratoire du SENAMHI (El Alto, Bolivie), par filtration (GFC) et pesée. Les dosages des différents éléments de la phase dissoute ont été effectués au laboratoire de l'IIQ-UMSA (La Paz, Bolivie), par volumétrie (HCO_3^-), colorimétrie (Cl , SO_4 , SiO_2), absorption atomique (Ca,

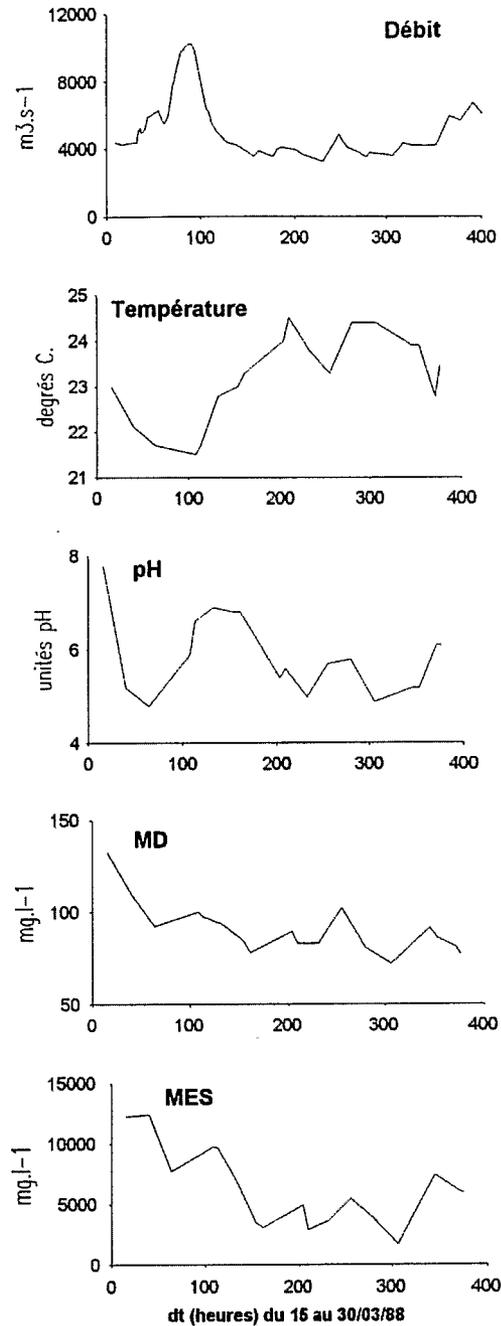


Figure 4: Evolution du débit, de la température, du pH, des MD et MES, Rio Béni à Angosto del Bala, du 15 au 30 mars 1988.

Figure 4: Discharge, temperature, pH, TDS and TSS evolution, Béni river at Angosto del Bala, from March 15 to 30, 1988.

Mg, Fe) ou émission de flamme (Na, K). Le carbone organique (COT, COD) a été dosé au CEMAGREF (Lyon, France) à l'aide d'un analyseur infrarouge non dispersif. La granulométrie (laser), la minéralogie (diffractométrie X) et la géochimie par spectrométrie

LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES EXPORTES DES ANDES PAR LE RIO BENI

de fluorescence X (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , TiO_2 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 , Perte au feu à 1000°C , et éléments traces) des matières en suspension a été réalisée à l'IGBA (Bordeaux, France).

IV. LES RÉSULTATS

La période d'étude (mars 1988) se situe en hautes eaux et survient après plusieurs épisodes de crue (Figure 2). Pendant cette période d'observation, l'hydrogramme présente du 15 au 18 mars une montée de crue dont le débit de pointe dépasse $10000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 4). La décrue est rapide et s'effectue du 19 au 20 Mars. Ensuite, apparaît une période assez stable, aux débits plus modestes. En fin d'observation, du 30 au 31 Mars, une nouvelle montée de crue importante s'amorce. Les variations du débit s'accompagnent d'importants changements de la physico-chimie des eaux. La première grande crue entraîne une très forte chute du pH et une diminution plus faible de la température, des matières en suspension (MES) et des matières dissoutes (MD). Les teneurs varient dans un rapport de 1 à 7 pour les MES, mais de 1 à 2 seulement pour la minéralisation (Figure 4).

IV. A. - PHASE DISSOUTE

La salinité des eaux montre une évolution temporelle particulière, apparemment sans liaison directe avec les débits. Les concentrations maximales ($130 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) correspondent au début de la période d'observation (Fi-

gure 4). Cependant, à l'inverse de ce qui est généralement observé lors des crues, la minéralisation et les MES sont positivement corrélées (Figure 5). Ceci s'explique par le fait que dans le bassin du Rio Béni, les sédiments et les sels dissous proviennent majoritairement des mêmes bassins (rios La Paz, Luribay, Consata) aux roches à la fois hautement érodables et très solubles (Guyot, 1992).

Les variations des concentrations en éléments dissous restent faibles et les teneurs relatives des différents éléments sont peu variables au cours de la période d'observation (Tableau III). Les coefficients de variation (C.V.) les plus élevés correspondent en fait aux éléments dont les concentrations sont les plus faibles (Fe), ou dosés par colorimétrie (Cl, SO_4 , SiO_2), et semblent traduire l'imprécision des analyses, plus qu'une réelle variabilité.

IV. B. - PHASE PARTICULAIRE

Les matières en suspension présentent une évolution temporelle semblable à celle de la salinité, avec des variations de plus forte amplitude (teneurs en MES environ 100 fois plus élevées que teneurs en matières dissoutes). Les maxima de concentration ($>12 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) sont observés également au tout début de la montée de crue. Les teneurs diminuent ensuite progressivement au cours de la période d'observation (Figures 4 & 5).

La granulométrie des matières en suspension a été mesurée sur trois échantillons correspondant à des débits variant de 3500 à $4600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'essentiel du matériel est silteux, alors que les sables (>63 microns) et

Date	Temp. °C.	pH	Coul. Pt/Co	MES mg/l	MD mg/l	HCO ₃ %	Cl %	SO ₄ %	Ca %	Mg %	Na %	K %	Fe %	SiO ₂ %
15/3/88 pm	23.0	7.8	51	2280	132.6	47.8	2.3	16.3	15.6	9.1	5.3	1.6	0.08	1.9
16/3/88 am	22.1	5.2	151	2421	109.8	53.9	1.5	9.6	17.6	8.0	4.6	1.8	0.09	3.0
17/3/88 am	21.7	4.8	50	7708	92.2	53.6	1.7	8.2	17.9	8.4	4.4	2.0	0.22	3.6
19/3/88 am	21.5	5.9	20	9772	100.2	53.6	1.1	9.2	17.6	8.8	4.2	1.8	0.10	3.7
19/3/88 pm	21.7	6.6	10	9694	97.4	51.3	0.8	7.4	18.5	9.0	4.7	1.8	0.10	6.3
20/3/88 pm	22.8	6.9	20	6976	93.5	46.3	0.9	16.9	16.0	8.2	4.5	1.8	0.11	5.2
21/3/88 am	23.0	6.8	30	3458	84.5	50.9	2.2	8.3	16.4	9.1	5.0	1.9	0.12	6.0
21/3/88 pm	23.3	6.8	10	3063	78.0	48.8	2.4	6.8	17.4	8.5	5.5	1.9	0.13	8.5
23/3/88 am	24.0	5.4	35	4953	89.4	49.1	2.7	7.4	17.2	7.4	5.6	2.0	0.11	8.5
23/3/88 pm	24.5	5.6	50	2910	83.1	51.4	2.3	9.3	17.0	7.9	5.4	1.8	0.24	4.7
24/3/88 pm	23.8	5.0	15	3608	83.0	47.0	1.3	10.7	19.6	9.3	5.5	1.7	0.12	4.7
25/3/88 pm	23.3	5.7	55	5460	102.2	54.9	2.5	7.5	17.5	6.5	4.2	1.7	0.20	5.0
26/3/88 pm	24.4	5.8	55	3876	80.7	52.7	3.3	3.5	18.2	8.2	5.9	2.1	0.25	5.8
27/3/88 pm	24.4	4.9	60	1681	72.0	49.2	4.0	6.3	16.1	7.6	5.6	1.9	0.28	9.0
29/3/88 am	23.9	5.2	55	7397	91.3	49.4	2.5	8.8	17.7	8.4	5.4	2.0	0.22	5.6
29/3/88 pm	23.9	5.2	30	7041	86.0	49.0	1.3	11.9	18.3	9.0	5.2	1.9	0.12	3.5
30/3/88 am	22.8	6.1	90	6060	81.2	49.9	2.6	10.7	15.8	8.1	5.2	2.2	0.49	5.0
30/3/88 pm	23.5	6.1	65	5903	76.6	47.0	3.0	10.3	17.2	8.6	5.7	2.2	0.52	5.4
Moyenne	23.2	5.9	37	6348	90.8	50.3	2.1	9.4	17.3	8.3	5.1	1.9	0.19	5.3
C.V.	0.04	0.14	0.64	0.50	0.16	0.05	0.41	0.35	0.06	0.08	0.11	0.09	0.67	0.36

Tableau III : Teneurs relatives des éléments majeurs de la phase dissoute, Rio Béni à Angosto del Bala.

Table III : TDS major elements relative concentrations, Béni river at Angosto del Bala.

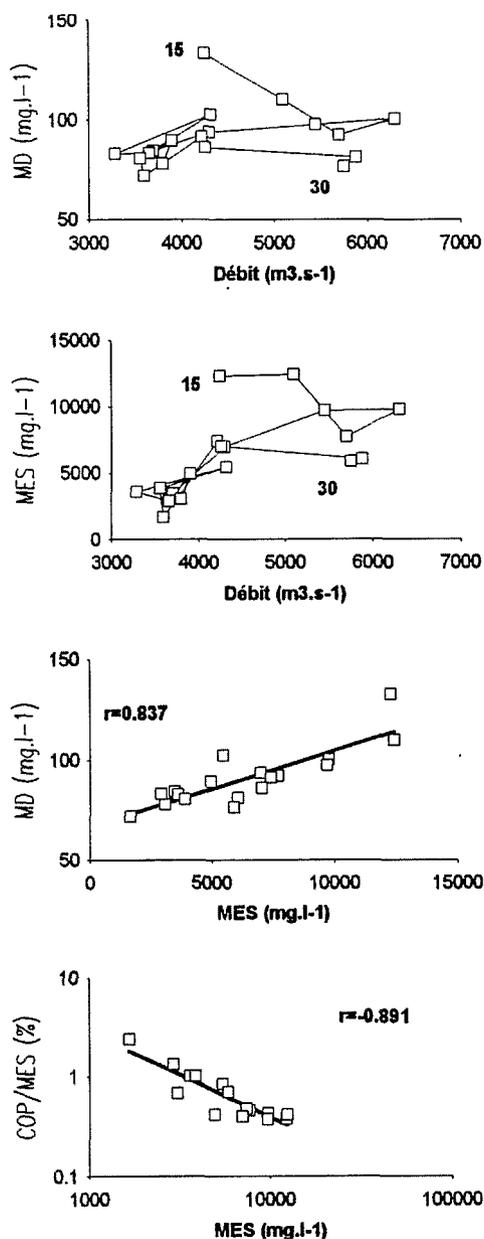


Figure 5 : MD vs. Débit, MES vs. Débit, MD vs. MES, COP/MES vs. MES, Rio Béni à Angosto del Bala du 15 au 30 Mars 1988.

Figure 5 : TDS vs. discharge, TSS vs. discharge, TDS vs. TSS and POC/TSS vs. TSS, Béni river at Angosto del Bala, from March 15 to 30, 1988.

les argiles (<4 microns) ne représentent respectivement que 35 % et 3 % des matières particulaires. Pour la fraction argileuse, l'illite et la chlorite, produits de l'érosion physique de la chaîne andine, sont largement dominants (Tableau IV), ce qui confirme les observations effectuées sur d'autres tributaires andins de l'Amazone (Irion, 1983). La teneur en kaolinite-smectite présente au cours de la crue des variations sensibles, permettant d'individualiser des événements où la teneur relative

dépasse 20 % (16-17/03 et 23-25/03), correspondant aux apports de cours d'eau (rios La Paz, Luribay) drainant les formations sédimentaires tertiaires intra-andines (Guyot, 1992).

Date	Illite %	Chlorite %	Kaolinite %	Smectite %
15/3/88 pm	67	17	14	2
16/3/88 am	62	18	12	8
17/3/88 am	61	14	18	7
19/3/88 am	69	20	7	4
19/3/88 pm	69	21	6	4
20/3/88 pm	63	29	8	0
21/3/88 pm	63	27	7	3
23/3/88 am	56	18	18	8
23/3/88 pm	60	17	17	6
24/3/88 pm	64	16	14	6
25/3/88 pm	58	13	24	5
26/3/88 pm	62	21	14	3
27/3/88 pm	61	21	14	4
29/3/88 pm	65	17	14	4
30/3/88 am	59	29	9	3
Moyenne	63	20	13	4
C.V.	0.06	0.25	0.39	0.50

Tableau IV : Minéralogie de la fraction argileuse des MES, Rio Béni à Angosto del Bala.

Table IV : TSS clay mineralogy, Béni river at Angosto del Bala.

Les éléments majeurs présentent de très faibles variations temporelles de leurs teneurs relatives (%). La qualité géochimique du matériel sédimentaire exporté par le bassin reste donc constante tout au long de la période d'observation (Tableau V), comme cela est observé sous pratiquement tous les climats (Ongley, 1982, Meybeck, 1984). Le Rio Béni à Angosto del Bala possède des teneurs voisines de la moyenne mondiale (Martin & Meybeck, 1979). Les teneurs en Si sont plus fortes que celles de l'Amazone, au détriment de Al et Fe, traduisant un caractère géochimique plus jeune, plus andin. Les teneurs en Mg et surtout Ca sont nettement plus faibles sur le Rio Béni par rapport à l'Amazone, ou à la moyenne mondiale, du fait de l'absence de séries carbonatées dans les Andes boliviennes, contrairement à ce qui est observé au Pérou.

Par contre, certains éléments traces de la phase particulaire présentent dans le temps, des variations sensibles de leurs teneurs relatives (Tableau VI). Ainsi, le 26 mars est marqué par un enrichissement notable en Cu et un appauvrissement en Ga, Pb, Rb, Sr et Zr, conséquence de l'apport préférentiel de tributaires andins aux caractéristiques géochimiques propres, comme les rios Unduavi, Coroico et Zongo (Guyot, 1992).

IV. C. PHASE ORGANIQUE

Les seuls résultats concernant la matière organique sont ceux relatifs au carbone organique total (COT) et dissous (COD). Le carbone organique particulaire (COP) est obtenu par différence. Le COD varie peu au cours de la période d'étude, et la valeur de 4 mg.l⁻¹ semble être assez caractéristique de cette station. Le COP, par contre, présente de fortes variations liées aux teneurs en MES. La teneur relative de COP dans les MES diminue alors que la charge en MES augmente. Ces observations sont en accord avec celles des autres

LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES EXPORTES DES ANDES PAR LE RIO BENI

Date	MES mg/l	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	TiO ₂ %	K ₂ O %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	P—Feu %
15/3/88 pm	12280	56.4	21.4	8.02	0.09	1.21	0.34	1.01	3.91	0.83	0.21	6.46
16/3/88 am	12421	60.4	19.4	7.44	0.08	1.10	0.32	1.00	3.29	0.80	0.20	5.90
17/3/88 am	7708	59.4	19.5	7.66	0.08	1.28	0.38	0.97	3.38	0.74	0.21	6.34
19/3/88 am	9772	58.0	20.2	8.00	0.08	0.97	0.26	1.03	3.75	0.77	0.21	6.54
19/3/88 pm	9694	55.9	22.7	7.75	0.09	1.21	0.31	1.04	3.67	1.18	0.20	5.89
21/3/88 pm	3063	60.8	18.8	7.81	0.08	1.13	0.34	1.00	3.28	0.86	0.21	5.51
23/3/88 am	4953	59.3	19.5	7.70	0.08	1.45	0.34	0.95	3.21	0.88	0.21	6.29
23/3/88 pm	2910	60.6	18.5	7.90	0.07	1.28	0.33	0.96	3.33	0.64	0.21	6.10
24/3/88 pm	3608	59.6	19.3	7.71	0.08	1.14	0.38	0.95	3.44	0.93	0.21	6.18
25/3/88 pm	5460	60.1	18.5	7.80	0.08	1.18	0.38	1.00	3.52	0.71	0.20	6.35
26/3/88 pm	3876	63.0	17.2	7.80	0.08	0.96	0.31	0.96	3.16	0.64	0.21	5.61
27/3/88 pm	1681	60.5	19.0	7.57	0.08	1.25	0.30	0.99	3.28	0.82	0.21	5.91
29/3/88 am	7397	59.7	19.0	8.12	0.08	1.12	0.37	1.04	3.54	0.72	0.21	5.96
Moyenne	6525	59.5	19.4	7.79	0.08	1.18	0.34	0.99	3.44	0.81	0.21	6.08
C.V.	0.56	0.03	0.07	0.02	0.05	0.11	0.11	0.03	0.07	0.18	0.02	0.05

Tableau V : Teneurs relatives des éléments majeurs de la phase particulaire, Rio Béni à Angosto del Bala.

Table V : TSS major elements relative concentrations, Béni river at Angosto del Bala.

régions du monde, et complètent le graphique proposé par Meybeck (1982), pour des teneurs en MES dépassant 5 g l⁻¹ (Figure 5). Le carbone organique durant cet épisode de crue est donc à 90 % sous forme particulaire (Tableau VII). En l'absence d'eaux calmes dans ce bassin montagneux, ce COP doit être essentiellement d'origine détritique.

V. CONCLUSION

L'interprétation de l'ensemble des résultats obtenus lors d'une campagne d'échantillonnage du Rio Béni an mars 1988 à Angosto del Bala permet de connaître la

réponse hydrogéochimique de ce bassin andin tropical en hautes eaux.

* Un bilan précis du flux de matières dissoutes et particulaires a pu être établi pour les 16 jours de la période d'observation. L'exportation de matières particulaires représente 99 % du volume total exporté. Une période de hautes eaux, qui ne représente que 4 % en durée du cycle hydrologique, peut ainsi fournir respectivement 30 et 20 % du volume moyen annuel de sédiments exporté par le Rio Béni à cette station et par le Rio Madeira à Villabella.

* Les variations du débit peuvent entraîner de grandes variations de la température, du pH et des teneurs en matières dissoutes et particulaires, et il n'existe pas

Date	MES mg/l	Pb µg/g	Cu µg/g	Ba µg/g	Zn µg/g	Ni µg/g	Zr µg/g	Rb µg/g	Sr µg/g	S µg/g	P µg/g	C µg	Co µg/g	Nb µg/g	Ga µg/g
15/3/88 pm	12280	37	65	755	144	47	114	236	240	849	871	84	18	43	29
16/3/88 am	12421	38	61	547	126	41	139	210	224	595	856	81	30	44	29
17/3/88 am	7708	46	68	597	128	46	132	216	224	600	876	99	24	44	28
19/3/88 am	9772	37	60	762	132	43	115	230	223	542	853	100	26	45	28
19/3/88 pm	9694	42	63	709	138	49	131	235	234	647	845	106	21	46	28
21/3/88 pm	3063	39	58	633	135	42	126	217	217	542	880	75	30	44	27
23/3/88 am	4953	35	58	531	128	44	144	215	223	476	880	76	28	40	28
23/3/88 pm	2910	41	64	531	126	44	124	214	226	502	862	66	15	43	27
24/3/88 pm	3608	26	62	602	136	38	125	232	246	624	890	77	21	46	25
25/3/88 pm	5460	37	59	486	126	47	132	225	248	485	912	78	10	50	29
26/3/88 pm	3876	15	126	543	102	42	72	117	145	506	839	77	15	20	19
27/3/88 pm	1681	27	61	449	112	42	139	225	238	545	859	82	17	45	28
29/3/88 am	7397	35	62	520	115	44	138	229	241	512	872	76	28	45	30
Moyenne	6525	35	67	590	127	44	125	215	225	571	869	83	22	43	27
C.V.	0.56	0.23	0.27	0.17	0.09	0.07	0.15	0.14	0.12	0.17	0.02	0.14	0.30	0.17	0.10

Tableau VI : Teneurs relatives des éléments traces de la phase particulaire, Rio Béni à Angosto del Bala.

Table VI : TSS trace elements relative concentrations, Béni river at Angosto del Bala.

Date	MD mg/l	MES mg/l	COD mg/l	COP mg/l	COT mg/l	COD %MD	COP %MES
15/3/88 pm	132.6	12280	2.7	46.1	48.8	2.0	0.4
16/3/88 am	109.8	12421	4.1	51.5	55.6	3.7	0.4
17/3/88 am	92.2	7708	3.9	34.7	38.6	4.2	0.5
19/3/88 am	100.2	9772	4.6	41.4	46.0	4.6	0.4
19/3/88 pm	97.4	9694	3.5	36.0	39.5	3.6	0.4
21/3/88 pm	78.0	3063	3.1	20.9	24.0	4.0	0.7
23/3/88 am	89.4	4953	3.7	20.5	24.2	4.1	0.4
23/3/88 pm	83.1	2910	5.1	38.9	44.0	6.1	1.3
24/3/88 pm	83.0	3608	3.2	36.4	39.6	3.9	1.0
25/3/88 pm	102.2	5460	4.8	46.1	50.9	4.7	0.8
26/3/88 pm	80.7	3876	4.4	39.3	43.7	5.5	1.0
27/3/88 pm	72.0	1681	4.8	40.3	45.1	6.7	2.4
29/3/88 am	91.3	7397	3.3	34.9	38.2	3.6	0.5
29/3/88 pm	86.0	7041	3.3	27.8	31.1	3.8	0.4
30/3/88 pm	76.6	5903	4.9	40.8	45.7	6.4	0.7
Moyenne	91.6	6518	4.0	37.0	41.0	4.5	0.8
C.V.	0.17	0.52	0.19	0.23	0.22	0.28	0.72

Tableau VII : Teneurs en carbone organique, Rio Béni à Angosto del Bala.

Table VII : DOC and POC concentrations, Beni river at Angosto del Bala.

de relation simple liant les matières en suspension ou la salinité au débit. Cette particularité est liée à l'extension du bassin (67500 km²), mais surtout à sa grande diversité bio-géographique.

- * Par contre, la qualité (teneurs relatives) des éléments majeurs des matières dissoutes et particulaires reste stable tout au long de la période d'observation, malgré l'apparition d'une crue de fréquence annuelle. Cette constance du signal géochimique va permettre d'établir les bilans élémentaires à chaque station du réseau PHICAB, sur la base d'un échantillonnage réduit.
- * Toutefois, des variations sensibles de la minéralogie des argiles et des teneurs de certains éléments traces des MES, permettent d'identifier l'origine des apports des différents sous-bassins montagneux. A l'échelle de ce bassin andin, ces éléments constituent des traceurs géochimiques naturels.

Remerciements

Nous tenons à remercier le SENAMHI pour sa collaboration, et plus particulièrement Héctor CALLE pour ses déterminations physico-chimiques, et Hubert GALLARDO pour ses mesures et échantillons à Angosto del Bala.

Manuscrit déposé le 25 juin 1991
accepté le 20 avril 1993

REFERENCES

- ABASTO N., HOORELBECKE R., ROCHE M.A., RUBIN de CELIS M. (1985). - Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrogramas de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca Amazonica de Bolivia. Publ. PHICAB, La Paz, 70 p.
- BARRAGAN M.C. (1990). - Estudio sedimentológico de la cuenca andina del rio Beni. Tesis UMSA, La Paz, 267 p.
- BOURGES J., GUYOT J.L., CARRASCO M., BARRAGAN M.C., CORTES J. (1990). - Evolution spatio-temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes boliviennes: le rio Béni. In LANG H. and MUSY A. Ed., Water Resources in Mountainous Regions. IAHS Publ. 193 : 351-356.
- ESPINOZA O. (1985). - Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Beni, Amazonia, Bolivia. Tesis UMSA, La Paz, 181 p.
- FERREIRA J.R., DEVOL A.H., MARTINELLI L.A., FORSBERG B.R., VICTORIA R.L., RICHEY J.E., MORTATTI J. (1988). - Chemical composition of the Madeira river: seasonal trends and total transport. *Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Scope/Unep Sonderband 66*: 63-75.
- GIBBS R.J. (1967). - The Geochemistry of the Amazon River System: Part I. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. America Bull.* 78: 1203-1232.
- GUYOT J.L. (1992). - Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux, 362 p.
- GUYOT J.L., BOURGES J., HOORELBECKE R., ROCHE M.A., CALLE H., CORTES J., BARRAGAN M.C. (1988). - Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le rio Béni, Bolivie. In BORDAS M. and WALLING D.E. Ed., Sediment Budgets. IAHS Publ. 174: 443-451.
- GUYOT J.L., BOURGES J., CALLE H., CORTES J., HOORELBECKE R., ROCHE M.A. (1989). - Transport of suspended sediments to the Amazon by an andean river: the River Mamore, Bolivia. In River Sedimentation, Beijing, Nov. 1989. IRTCES Publ.: 106-113.
- IRION G. (1983). - Clay mineralogy of the suspended load of the Amazon and of rivers in the Papua New Guinea mainland. *Mitt. Geol. Palaont. Inst. Univ. Hamburg, Scope/Unep Sonderband, 55*: 483-504.
- MARTIN J.M., MEYBECK M. (1979). Elemental mass balance of material carried by major world rivers. *Marine Chemistry, 7*: 173-206.
- MEADE R.H., NORDIN C.F., CURTIS W.F., COSTA RODRIGUES F.M., DO VALE C.M., EDMOND J.M. (1979). Sediment loads in the Amazon river. *Nature*, 278: 161-163.
- MEADE R.H., DUNNE T., RICHEY J.E., SANTOS U.M., SALATI E. (1985). Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon river of Brazil. *Science*, 228: 488-490.
- MEYBECK M. (1982). - Carbon, Nitrogen, and Phosphorus transport by World rivers. *American Journal of Science* 282: 401-450.

LES FLUX DE MATIERES DISSOUTES ET PARTICULAIRES EXPORTES DES ANDES PAR LE RIO BENI

- MEYBECK M. (1984). - Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Paris VI, 558 p.
- MOLINIER M. (1992). - Régionalisation des débits du bassin amazonien. In Régionalisation en hydrologie et application au développement, Montpellier, Sept. 92.
- ONGLEY E.D. (1982). Influence of season, source and distance on physical and chemical properties of suspended sediment. In WALLING D.E. Ed., Recent developments in the explanation and prediction of erosion and sediment yield. IAHS Publ. 137: 371-383.
- RICHEY J.E., MEADE R.H., SALATI E., DEVOL A.H., NORDIN C.F., DOS SANTOS U. (1986). - Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon River: 1982-1984. Water Resources Research, 22(5): 756-764.
- ROCHE M.A., ALIAGA A., CAMPOS J., PENA J., CORTES J., ROCHA N. (1990). - Hétérogénéité des précipitations sur la cordillère des Andes boliviennes. In LANG H. and MUSY A. Ed. I Water resources in mountainous regions. IAHS Publ. 193: 381-388.
- ROCHE M.A., FERNANDEZ C. (1988). - Water resources, salinity and salt exportations of the rivers of the Bolivian Amazon. Journal of Hydrology, 101: 305-331.