

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



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 particulières. Ce travail expose les résultats obtenus sur le bassin

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

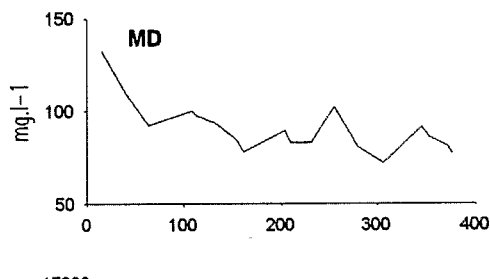
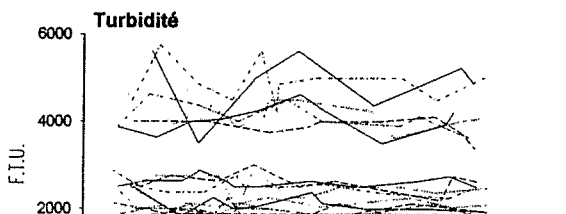
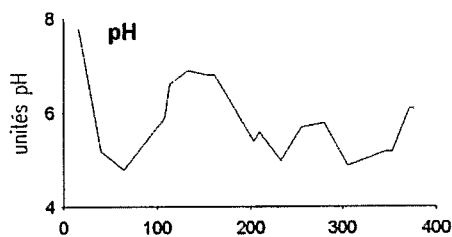
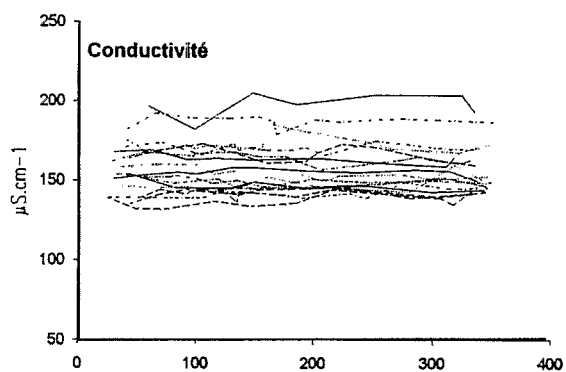
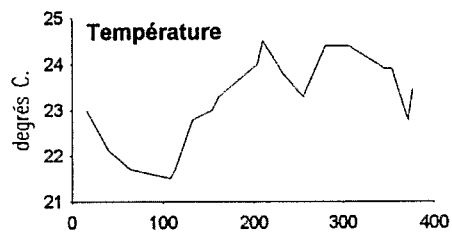
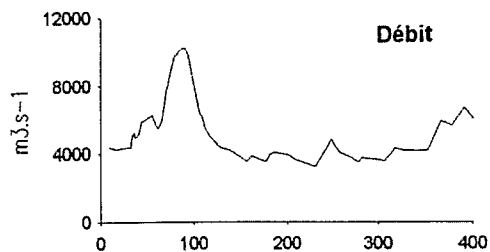
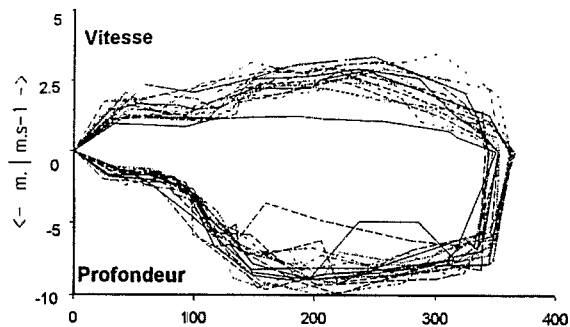
Station	Superficie		Débit				MD			MES					
	km ²	%	Ref.	m ³ /s	%	%	Ref.	10 ⁶ /an	%	%	Ref.	10 ⁶ /an	%	%	
Amazone à l'embouchure	6112000	100	(a)	209000	100		(c)	290	100		(e)	1200	100		
	1420000	23	(a)	31200	15		(d)	45	16		(d)	500	42		
Rio Madeira a Villabella	903500	15	100	(b)	17000	8	100	(b)	40	14	100	(b)	230	19	100
Rio Beni à Cachuela Esperanza	282500	5	31	(b)	8920	4	52	(b)	21	7	53	(b)	161	13	70
Rio Beni à Angosto del Bala	67500	1	7	(b)	2050	1	12	(b)	5	2	13	(b)	165	14	72

Tableau 1: 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 1: 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

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



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

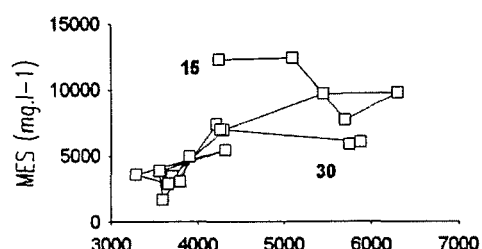
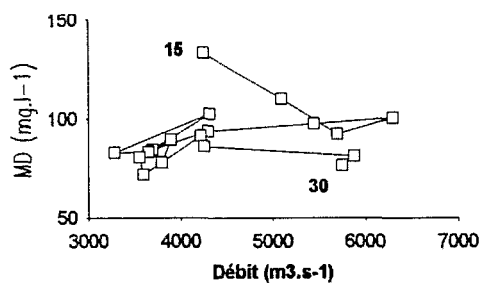
Les matières en suspension présentent une évolution temporelle semblable à celle de la salinité, avec des variations de plus forte amplitude (teneurs en MES environ 100 fois plus élevées que teneurs en matières dissoutes). Les maxima de concentration ($>12 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) sont observés 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 C.V.	23.2 0.04	5.9 0.14	37 0.64	6348 0.50	90.8 0.16	50.3 0.05	2.1 0.41	9.4 0.35	17.3 0.06	8.3 0.08	5.1 0.11	1.9 0.09	0.19 0.67	5.3 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.



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 - Les minéraux de Rio Béni et Angosto del Bala

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 am	5460	27	59	499	126	47	122	225	249	485	848	78	19	45	28

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 ré-

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.

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 *Water Resources Research*, 18(5): 1223-1231.

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. *Water resources in mountainous regions*. IAHS Publ. 193: 381-388.