

LES FLUX DE MATIÈRES DISSOUTES ET PARTICULAIRES DES ANDES DE BOLIVIE VERS LE RIO MADEIRA EN AMAZONIE BRÉSILIENNE

Jean Loup Guyot^{}, Jorge Quintanilla^{**}, José Cortés^{***}, Naziano Filizola^{****}*

Résumé

Le Rio Madeira est le principal affluent méridional de l'Amazone et le deuxième tributaire andin du bassin. L'utilisation des données obtenues en Bolivie par le PHICAB (1), et au Brésil sur le réseau du DNAEE (2), a permis de suivre l'évolution des flux de matières dissoutes et particulaires, depuis les Andes jusqu'à l'Amazone. Les flux de matières en solution [$36 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ à Villabella (3)] augmentent progressivement d'amont en aval avec les débits. Les flux de matières en suspension diminuent du piedmont andin jusqu'à Villabella ($258 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$) du fait d'une forte sédimentation. Ensuite, les différences notables observées au Brésil posent clairement le problème des modes d'échantillonnage et de calcul des flux sédimentaires.

Mots-clés : *Andes, Amazone, hydrologie, Bolivie, Brésil, Madeira, matières en suspension, matières dissoutes.*

LOS FLUJOS DE MATERIA DISUELTA Y PARTICULAR DESDE LOS ANDES DE BOLIVIA HASTA EL RÍO MADEIRA EN EL AMAZONAS DE BRASIL

Resumen

El río Madeira es el principal afluente meridional del Amazonas, y el segundo tributario andino de la cuenca. La utilización de los datos obtenidos en Bolivia por el PHICAB (1), y en el Brasil sobre la red del DNAEE (2) permite conocer la evolución de los flujos de materia disuelta y particular, desde los Andes hasta el Amazonas. Los aportes en materia disuelta [$36 \cdot 10^6 \text{ t año}^{-1}$ en Villabella (3)] aumentan progresivamente de aguas arriba para aguas abajo, con el caudal. Los flujos de materias en suspensión disminuyen desde el Piedemonte hasta Villabella ($258 \cdot 10^6 \text{ t año}^{-1}$) por causa de una fuerte sedimentación.

* ORSTOM, CP 09747, CEP 70001-970 Brasília DF, Brasil

** IIQ-UMSA, CP 303, La Paz, Bolivia.

*** SENAMHI, CP 10993, La Paz, Bolivia.

**** DNAEE-CGRH, SGAN 603, 70830-030 Brasília DF, Brasil

(1) Programa Climatológico e Hidrológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia : ORSTOM (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia), UMSA (Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia).

(2) Departamento de Aguas e Energia Elétrica do Brasil

(3) Petite ville située à la frontière boliviano-brésilienne, à la confluence des rios Béni et Mamoré.

Después, las diferencias notables observadas en el Brasil colocan claramente el problema de los tipos de muestreo y de cálculo de los flujos de sedimentos.

Palabras claves: *Andes, Amazonas, hidrología, Bolivia, Brasil, Madeira, materias en suspensión, materias disueltas.*

THE DISSOLVED AND SEDIMENT YIELDS FROM THE ANDES OF BOLIVIA TO THE MADEIRA RIVER IN THE BRAZILIAN AMAZON

Abstract

The Madeira river is the main Southern tributary of the Amazon, and the second Andean tributary of the drainage basin. The use of Bolivian data from the PHICAB (1), and Brazilian data from the DNAEE (2), allow to estimate the dissolved and sediment yields evolution, from the Andes to the Amazon river. Dissolved yield [$36 \cdot 10^6 \text{ t yr}^{-1}$ at Villabella (3)] increase progressively from upstream to downstream, like the discharge. Sediment yields decrease from the piedmont to Villabella ($258 \cdot 10^6 \text{ t yr}^{-1}$) because strong sedimentation occurs in the floodplain. Then, significative differences observed in Brazil are probably linked with sediment load sampling technique and calculation method.

Key words: *Andes, Amazon, hydrology, Bolivia, Brazil, Madeira, sediment yield, dissolved yield.*

INTRODUCTION

Avec un bassin de plus de 6 millions de km^2 et un module de $209 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Molinier *et al.*, 1994), l'Amazone est le premier fleuve de la planète. Les apports de matières à l'océan Atlantique par l'Amazone sont estimés à $270 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour les matières dissoutes (Martinelli *et al.*, 1989) et de $1 \cdot 100$ à $1 \cdot 300 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour les matières particulaires (Meade *et al.*, 1979 ; 1985; Richey *et al.*, 1986; Meade, 1994).

Issu de la Cordillère Orientale des Andes du Pérou et de Bolivie, le Rio Madeira, qui draine un bassin de $1,4 \cdot 10^6 \text{ km}^2$, fournit à l'Amazone un débit moyen de $31,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Molinier *et al.*, 1993). Les travaux précurseurs de Gibbs (1967) indiquaient pour le Rio Madeira à l'endroit où il rejoint l'Amazone, des flux de matières dissoutes et particulaires respectivement de $59 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ et $217 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$. Les travaux ultérieurs, produits notamment par les programmes ALPHA-HELIX (4), puis CAMREX (5) en Amazonie brésilienne, allaient montrer que les résultats de Gibbs (échantillonnage de surface) sous-estimaient largement les flux sédimentaires. Les apports du Rio Madeira à l'Amazone ont alors été estimés à $37\text{-}45 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour les matières en solution, et à $550 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour les matières en suspension (Ferreira *et al.*, 1988; Martinelli *et al.*, 1989 ; 1993). En Bolivie, les résultats obtenus de 1983 à 1990 par le programme PHICAB sur le haut bassin du Rio Madeira, montrent qu'à Villabella (confluence des rios Beni et Mamore à l'amont de Porto Velho), le Rio Madeira reçoit un flux de matières dissoutes de $35\text{-}40 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, et un flux de matières particulaires de $223 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ (Roche & Fernández, 1988 ; Guyot, 1993).

Si les résultats concernant les flux de matières dissoutes sont cohérents d'une étude à l'autre, il n'en est pas de même pour les matières en suspension : le flux sédimentaire observé à l'aval (près de la confluence avec l'Amazone) est le double de celui observé à

(4) Alpha Helix Amazon Expedition : US Geological Survey (Denver, USA), University of California (USA), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil), INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia, Manaus, Brasil).

(5) Carbon Amazon Modelling Experiment : University of Washington (Seattle, USA), CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, Brazil), INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia, Manaus, Brazil).

Villabella. Pourquoi ? Pour tenter de répondre à cette question, une étude critique des données du PHICAB a été réalisée, avec une mise à jour des informations de Bolivie (étalonnage des stations, données de l'année 1990) et l'utilisation des données du DNAEE pour le bassin brésilien du Rio Madeira.

1. LE BASSIN DU RIO MADEIRA

Le bassin du Rio Madeira, qui s'étend sur 3 pays (Bolivie, Brésil et Pérou), représente 23% de la totalité du bassin amazonien, 29% du bassin de l'Amazonie à Obidos, et draine 35% de la chaîne andine comprise dans le bassin amazonien. Les 3 grandes unités morpho-structurales observées sur l'ensemble de l'Amazonie sont présentes, mais avec cette particularité que le bouclier brésilien coupe la plaine amazonienne en deux ensembles distincts : la plaine amont et la plaine aval. Si la plaine aval fait partie intégrante de la vaste plaine amazonienne, la plaine amont est isolée par les affleurements précambriens du socle brésilien. Ceux-ci jouent le rôle de seuil hydraulique pour les tributaires andins du Rio Madeira, dont l'une des conséquences sera l'existence de vastes zones d'inondation au-dessus de 100 mètres d'altitude, à l'amont de ce seuil. Entre Guayaramerin (GM, Rio Mamoré) ou Cachuela Esperanza (CE, Rio Béni) et Porto Velho (PVL), le Rio Madeira traverse le bouclier brésilien sur plus de 350 km où une douzaine de rapides (Cachuelas ou Cachoeiras) lui font franchir environ 50 m de dénivelé (Fig. 1).

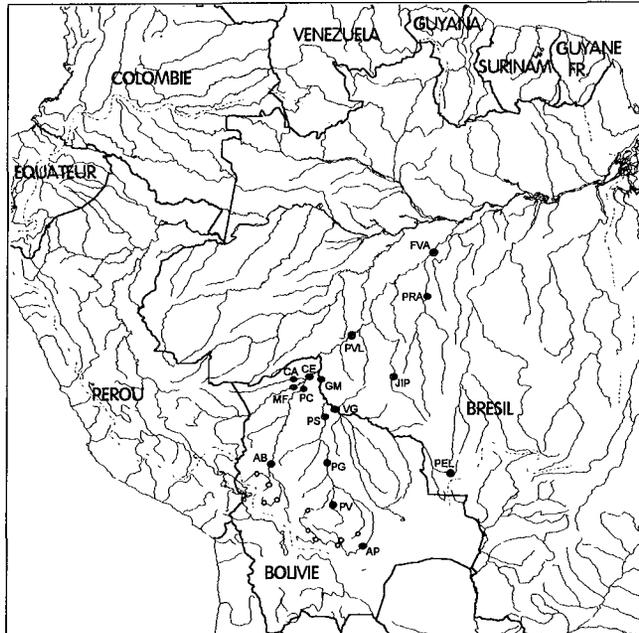


Fig. 1 - Le bassin de l'Amazonie.

[● : station hydrométrique du PHICAB en Bolivie, station sédimentométrique du DNAEE au Brésil, ○ : quelques stations sédimentométriques dans les Andes de Bolivie]. Le nom des stations repérées par leur code est donné dans le tableau 1.

Dans les Andes de Bolivie, les bassins versants étudiés sont extrêmement contrastés. Leur distribution va des bassins de zone semi-aride creusés dans les sédiments quaternaires de l'Altiplano (vallée du Rio La Paz), jusqu'aux bassins hyper-humides, à forêt tropicale, creusés dans les séries paléozoïques de la Cordillère Royale. Les précipitations varient suivant les bassins de 500 à 5 000 mm an⁻¹. Dans la plaine, cette distribution est plus uniforme avec une valeur moyenne annuelle de 1 800 mm pour la Bolivie (Roche *et al.*, 1992) et de 1 950 mm pour la partie brésilienne (DNAEE-ORSTOM, 1994).

Le régime hydrologique observé sur l'ensemble des cours d'eau du bassin du Rio Madeira à Villabella (VB = CE + GM) est de type pluvial tropical austral, caractérisé par l'alternance brutale entre sécheresse de saison froide et surabondance des pluies en saison chaude. Dans les Andes et leur piedmont, les hydrogrammes à multiples crues se fondent vers l'aval pour donner naissance à la grande crue annuelle de type tropical, précédée ou suivie de petites crues bien différenciées. La crue annuelle apparaît ainsi de moins en moins dentelée de l'amont vers l'aval des grands fleuves. Elle est davantage régularisée et aplatie sur le Rio Mamoré et le Rio Itenez en raison de trajets plus longs et surtout de l'extension de vastes zones d'inondation sur ces deux bassins (Bourges *et al.*, 1993).

2. LES FLUX DES MATIÈRES PARTICULAIRES

Les données utilisées, concernant 41 bassins emboîtés (Tableau 1), proviennent de plusieurs réseaux hydrométriques et correspondent à des périodes et des méthodes d'échantillonnage différentes. La comparaison de ces résultats est donc délicate. Les données des bassins andins de Bolivie, provenant des réseaux de ENDE (6), du SENAMHI et du SEARPI (7), correspondent à un échantillonnage sur plusieurs verticales dans la section de mesures, réalisé à l'aide d'échantillonneurs intégrateurs de différents modèles suivant la taille des cours d'eau. Les échantillons du bassin du Rio Achumani (petit cours d'eau andin d'altitude) ont été réalisés en surface au centre de la section, ainsi que quelques mesures de transport de fond [HAM (8)-PHICAB]. L'échantillonnage réalisé par le programme PHICAB était basé sur des prélèvements de surface décennaires (détermination des MES) et journaliers (détermination de la turbidité) réalisés par des observateurs recrutés à cet effet. Les valeurs obtenues étaient ensuite corrigées par une relation $[MES]_{\text{section}} = f([MES]_{\text{surface}})$. Dans la pratique, après avoir exploré la distribution des teneurs en MES dans la section à l'aide d'un échantillonneur intégrateur (USD-49, et de fabrication locale), lors de 61 jaugeages réalisés de 1986 à 1988, cette équation est devenue : $[MES]_{\text{section}} = 1,10 * [MES]_{\text{surface}}$. Les données provenant du bassin brésilien (réseau DNAEE) correspondent à des échantillons prélevés par des entreprises brésiliennes [CPRM (9) et/ou HIDROLOGIA/SA], à l'aide d'échantillonneurs intégrateurs de type USD-49.

Pour les cours d'eau boliviens, les flux de matières particulaires (QS) ont été calculés simplement de la façon suivante :

(6) Empresa Nacional de Electricidad (Cochabamba, Bolivie).

(7) Servicio de Encauzamiento de las Aguas del río Pirai (Santa Cruz de la Sierra, Bolivie).

(8) Honorable Alcaldía de La Paz (Bolivie)

(9) Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Brasil.

Tableau 1 - Caractéristiques des bassins étudiés et résultats des flux de matières en suspension (MES) et dissoutes (MD).

Code	Rio	Alt. m	Sup. km2	Période	Organisme	Débit m3.s-1	Nb. éch.		MES mg.l-1	QS 103 t.an-1	Ts t.km-2.an-1	MD		QD 103 t.an-1	Td t.km-2.an-1	
							MES	Turb.				MD	Cond.			
AQM	Mapiri à Angosto Quercano	500	9400	75-79	SENAMHI	420	351		2960	36800	3920					
SRC	Coroico à Santa Rita de Buenos Aires	440	4700	76-77	SENAMHI	260	49		870	7100	1510					
ACM	Aceró Marca à Unduavi	2960	61	87-88	ORSTOM	2.8	36		11	1	16					
UNV	Unduavi à Unduavi	2940	66	87-88	ORSTOM	3.0	38		21	2	30	36	39	3.4	22	
SIR	Unduavi à Sirupaya	1640	270	80-86	SENAMHI / ENDE	12	194		5990	2120	7850			3.1	21	
TAM	Tamampaya à Puente Villa	1185	950	75-85	SENAMHI / PHICAB	52	320		1270	2480	2610	8	986	39	64	35
VBA	Tamampaya à Villa Barnentos	1050	1900	75-84	SENAMHI	67	353		3160	7820	4120					
HUL	Huayllani à Achumani	3620	17	88-92	HAM / PHICAB	0.11	554	1039	18460	61	3590	9	807	91	0.3	12
ACH	Achumani à Achumani	3580	38	90-92	HAM / PHICAB	0.19	130		22490	140	3680					
LUR	Luribay à Luribay	2550	810	87-88	ORSTOM	10	39		20300	6400	7900	39		920	290	270
POR	Porvenir à Porvenir	2500	240	87-88	ORSTOM	3	36		8400	790	3300	36		420	40	90
CAJ	La Paz à Cajetillas	760	6500	73-75	SENAMHI	99	332		36340	118600	18250					
AIN	Alto Beni à Angosto Inucua	400	29900	75-83	SENAMHI	840	157		4800	115200	3850					
AB	Béni à Angosto del Bala	280	67500	69-90	SENAMHI / PHICAB	1990	456	541	3380	211700	3140	60	1077	83	5210	41
PC	Béni à Portachuelo	130	119000	83-90	PHICAB	3070	91	745	1260	121600	1020	48	916	84	8150	34
MF	Madre de Dios à Miraflores	130	124200	83-90	PHICAB	5210	226	1085	430	70900	570	71	1850	66	10900	40
CA	Orthon à Caracoles	125	32300	83-90	PHICAB	470	112	483	120	1770	55	35	1062	57	850	15
CE	Béni à Cachuela Esperanza	120	282500	83-90	PHICAB	8810	174	1043	690	190600	680	63	1937	71	19700	34
LOC	Santa Isabel à Locotal	1700	200	71-75	ENDE	15	1000		1430	670	3340					
PPA	Esperitu Santos à Palmar Pampa	600	160	71-74	ENDE	22	970		15450	10700	66600					
PV	Ichilo à Puerto Villarroel	170	7600	83-90	PHICAB	750	118	857	370	8710	1150	83	1211	52	1220	110
BER	Bermejo à Bermejo	900	480	77-83	SEARPI	4.2	2220		4530	600	1250					
ANG	Piray à Angostura	650	1420	76-85	SEARPI	10	3027		9360	2950	2080					
TAR	Piray à Taruma	600	1590	76-83	SEARPI	7.6	2264		5600	1340	840					
ELV	Elvira à Elvira	650	64	77-83	SEARPI	0.5	2162		1880	30	460					
EPS	Espejos à Espejos	550	203	77-83	SEARPI	2.6	2186		5070	420	2070					
LBE	Piray à La Belgica	350	2880	77-82	SEARPI	13	1684		5560	2280	790					
PEI	Piray à Puente Eisenhover	280	4160	77-82	SEARPI	20	1519		1690	1070	260					
AMO	Caine à Angosto Molineros	1850	9200	71-74	SENAMHI	66	580		51390	106300	11560					
HUR	Chayanta à Huayrapata	1600	11200	76-82	SENAMHI	112	282		6680	23600	2110					
ARC	Grande à Puente Arce	1500	23700	69-74	SENAMHI	127	868		33840	135700	5730					
PNA	Grande à Puesto Nava	950	31200	71-75	SENAMHI	250	938		25680	203400	6520					
MIZ	Mizque à Puesto Nava	950	10800	71-75	SENAMHI	70	897		11970	26300	2440					
PAZ	Azero à Puente Azero	1080	4360	75-82	SENAMHI	33	557		2020	2080	480					
AP	Grande à Abapo	450	59800	76-90	SENAMHI / PHICAB	330	851	876	12910	138200	2310	58	1549	458	4830	48
SAN	Parapeti à San Antonio	550	7500	76-83	SENAMHI	91	642		6770	19400	2590					
PG	Mamoré à Puerto Varador	140	159100	83-90	PHICAB	2970	120	643	680	63600	400	72	1059	95	8940	28
PS	Mamoré à Puerto Siles	130	216200	83-90	PHICAB	5080	148	883	290	47100	220	101	1141	87	13900	31
PEL	Guaporé à Pontes e Lacerda	300	2500	79-93	DNAEE	54	30		23	39	16					
VG	Itenez à Vuelta Grande	130	354300	83-90	PHICAB	2320	241	696	23	1700	5	116	1357	37	2740	4
GM	Mamoré à Guayaramerín	120	599400	83-90	PHICAB	7550	219	1236	280	66200	110	54	2103	69	16500	13
VB	Madeira à Villabella (CE+GM)	115	881900	83-90	PHICAB	16360			500	256800	290			70	36200	15
PVL	Madeira à Porto Velho		954300	78-93	DNAEE	20100			483	306100	320					
JIP	Jiparana à Jiparana		33000	81-93	DNAEE	690			55	1190	36					

1. QS_{mi} (du mois i) = $1/k * \sum Q_j * [MES]_j$
avec k = nombre de mesures journalières (j) dans le mois i
2. $QS_{mensuel}$ = $1/n * \sum QS_{mi}$
avec n = nombre d'années avec des valeurs de QS_{mi}
3. QS_{moyen} = $1/12 * \sum QS_{mensuel}$

Cette méthode simple a été utilisée pour l'ensemble du Brésil (Bordas *et al.*, 1988) en utilisant les données des stations du DNAEE ayant un nombre suffisant d'échantillons. Elle est préférable à celle des courbes de type : $QS = f(Q)$, du fait de la grande dispersion des points de cette relation (Fig. 2). Toutefois, ces courbes d'étalonnage ont été nécessaires pour le calcul des flux sédimentaires des stations du DNAEE sur le Rio Madeira au Brésil (PVL, JIP, PRA, FVA), compte tenu du très petit nombre (< 40) d'échantillons (Fig. 3). Cette méthode a également été employée par Martinelli *et al.* avec les données du programme CAMREX (1993). Pour les stations du réseau PHICAB en Bolivie, les données de turbidité ont permis de compléter les observations de MES, après avoir établi la relation : $[MES] = f(\text{Turbidité})$ pour chaque station hydrométrique. La concentration en MES indiquée dans le tableau 1 correspond à la valeur moyenne pondérée par les débits : $[MES] = QS/Q$.

Les résultats de 46 stations du bassin sont reportés dans le tableau 1. Pour la partie brésilienne, ces résultats sont provisoires car la banque de données du DNAEE est en cours de restructuration, et toutes les informations ne sont pas encore saisies (Filizola & Guyot, 1994). Les données des bassins andins de Bolivie peuvent présenter quelques différences avec les publications précédentes. En effet, la critique des courbes de tarage de ces cours d'eau a été revue récemment. Enfin, les données du réseau PHICAB ont été actualisées (ajout de l'année 1990) et les débits corrigés. Dans les Andes de Bolivie, les taux de transport de MES (T_s) sont très variables d'un bassin à l'autre, moins de $50 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ sur des petits bassins d'altitude de la Cordillère Royale (ACM, UNV) à plus de $50 \cdot 10^3 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ dans la région hyper-humide du Chaparé (PPA). Cette variabilité est liée aux caractéristiques biogéographiques des bassins. Malgré les différences de période d'observation et de méthodologie, les résultats sont cohérents de l'amont vers l'aval. La comparaison des données du SENAMHI (69-82) et du PHICAB (83-90) aux deux stations du piedmont andin montre qu'à Abapo, les résultats sont similaires, alors qu'à Angosto del Bala, ceux du PHICAB sont nettement plus faibles. Cette différence peut provenir de la technique

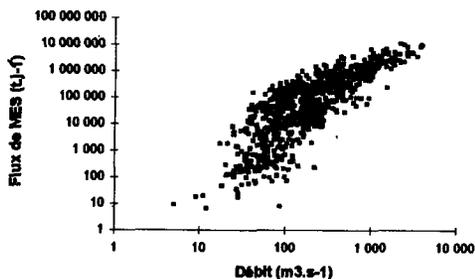


Fig. 2 - Flux de MES vs. débit Rio Grande à Abapo.

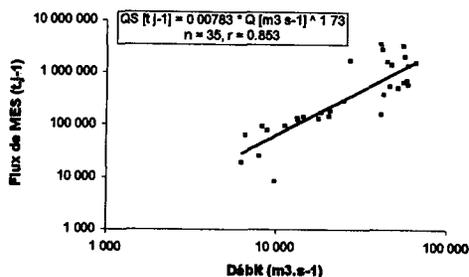


Fig. 3 - Courbe d'étalonnage $QS = f(Q)$ pour le calcul des flux de MES au Brésil, Rio Madeira à Fazenda Vista Alegre.

d'échantillonnage, comme de la fiabilité de l'observateur. Des phénomènes de sédimentation sont perceptibles le long des vallées, comme sur le Rio Grande entre PNA et AP (Guyot *et al.*, 1994). Le flux total de MES exportées par les bassins andins de Bolivie est estimé à environ $500-600 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, ce qui correspond à un taux de transport moyen de la chaîne andine voisin de $3 \cdot 200 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Lors de la traversée de la plaine amazonienne de Bolivie (Llanos), le flux de MES tend à décroître progressivement (43% sur le Rio Béni entre AB et PC, 54% sur le Rio Mamoré entre AP et PG), traduisant d'importants phénomènes de sédimentation dans la plaine inondable (Guyot *et al.*, 1988). Dans les Llanos, les données des apports de différents affluents sont cohérents avec ceux observés à l'aval ($PC+MF+CA \approx CE$, $PG+VG \approx GM$). Une anomalie est toutefois observée sur le Rio Mamoré entre PG et PS. Les données observées sur le Rio Orthon à CA donnent un aperçu des taux de transport ($55 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) affectant les séries sédimentaires tertiaires de la plaine amazonienne. Pour le bouclier brésilien, ce taux varie de 16 à $36 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$ suivant les stations (PEL, JIP, PRA), ce qui est du même ordre de grandeur que les observations antérieures (Bordas *et al.*, 1988 ; Mortatti *et al.*, 1989 ; 1992). La très faible valeur mesurée à l'exutoire (VG) du Rio Itenez-Guaporé ($5 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) traduit une forte sédimentation dans le cours du fleuve principal des matières exportées du bouclier. Ce phénomène est nettement visible en Amazonie brésilienne sur les cours inférieurs des rios Negro, Tapajós et Xingu (Sioli, 1984). D'après les données du PHICAB, le flux de MES du Rio Madeira à Villabella ($VB=CE+GM$) est de l'ordre de $250-300 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$. Cette valeur est compatible avec celle observée un peu plus à l'aval à Porto Velho (PVL, DNAEE), bien que correspondant à des périodes, des techniques d'échantillonnage et des modes de calcul différents. Près de la confluence avec l'Amazone, le flux de MES du Rio Madeira à FVA est estimé à la moitié. Cette différence est-elle due à des phénomènes de sédimentation dans le cours aval du Rio Madeira, ou reflète-t-elle seulement des erreurs d'estimation liées au faible nombre d'échantillons ? Enfin, ces résultats obtenus dans la partie brésilienne sont largement inférieurs à ceux publiés par CAMREX (Ferreira *et al.*, 1988 ; Martinelli *et al.*, 1993). Quelle peut en être la raison ? Cette différence majeure est-elle liée aux techniques d'échantillonnage ou de calcul des flux sédimentaires ?

3. LES FLUX DE MATIÈRES DISSOUTES

Pour les flux de matières dissoutes, les données proviennent uniquement de 6 stations andines de Bolivie (ACM, UNV, TAM, HUL, LUR, POR), et des 11 stations du réseau PHICAB en plaine amazonienne (Tableau 1). Tous les échantillons ont été prélevés en surface, la distribution des matières dissoutes dans la section de mesure étant très homogène.

Le calcul des flux de matières dissoutes a été réalisé suivant la même méthodologie que celui des MES (voir chapitre précédent). La relation : Salinité = $f(\text{Conductivité})$ a été établie pour chacune des 11 stations de la plaine amazonienne. L'équation obtenue a été utilisée pour le calcul des flux de matières dissoutes. La concentration en matières dissoutes (MD) indiquée dans le tableau 1 correspond à la valeur moyenne pondérée par les débits : $[MD] = QD/Q$. Le taux de transport en solution (Td) ou 'érosion chimique', a été calculé en tenant compte de la part des apports atmosphériques.

Les résultats du tableau 1 peuvent différer des précédentes publications, du fait de la modification des débits, mais aussi du fait que la concentration en MD affichée correspond à la moyenne pondérée par les débits. Dans les Andes boliviennes, les taux de transport en

solution (Td), étudiés dans le bassin de l'Alto-Béni, varient de 12 à 270 t km⁻² an⁻¹ (HUL, LUR), en fonction de la nature lithologique des bassins. Les deux principaux cours d'eau andins, le Rio Alto-Béni à Angosto del Bala (AB) et le Rio Grande à Abapo (AP), exportent des Andes la même quantité de MD (5 10⁶ t.an⁻¹), alors que les concentrations sont beaucoup plus élevées pour le Rio Grande. La faible pluviométrie observée sur ce bassin compense le plus fort indice de solubilité des roches affleurantes. En utilisant les résultats de ces deux stations (AB et AP) qui drainent 74% du domaine andin du bassin, le flux de MD exporté des Andes de Bolivie a été estimé à 14 10⁶ t an⁻¹, ce qui correspond après correction des apports atmosphériques, à un taux de transport en solution moyen de 40 t km⁻² an⁻¹, soit 80 fois plus faible que le taux de transport en suspension (Guyot, 1993). Les données du Rio Itenez-Guaporé (VG) suggèrent que le taux de transport en solution du bouclier brésilien est de l'ordre de 4 t km⁻² an⁻¹, ce qui est légèrement plus faible que les résultats obtenus sur des petits bassins du Rondonia : 10 t km⁻² an⁻¹ pour le Rio Jiparana, et 8 t km⁻² an⁻¹ pour le Rio Jamari (Mortatti *et al.*, 1992). Les résultats obtenus en Bolivie sont cohérents de l'amont vers l'aval (PC+MF+CA=CE, PS+VG=GM). Le flux calculé pour le Rio Madeira à Villabella (36 10⁶ t an⁻¹) est compatible avec les observations réalisées au Brésil près de la confluence avec l'Amazone (Martinelli *et al.*, 1989).

4. CONCLUSION

Les résultats obtenus dans les Andes de Bolivie montrent l'existence d'une forte hétérogénéité régionale, tant au niveau de la production de matières particulaires que de matières dissoutes. Le long des deux principaux transects (Rios Béni et Mamoré), le flux de matières dissoutes est conservatif, avec une augmentation progressive d'amont en aval liée à l'augmentation des débits. Par contre le même suivi d'amont en aval des flux de matières en suspension, montre l'existence de phénomènes de dépôts dans la partie aval des vallées andines, mais surtout dans les Llanos. Si les flux de matières dissoutes observés en Bolivie et au Brésil sont concordants, il n'en est pas de même pour le flux des matières particulaires. La diminution d'un facteur 2 peut vraisemblablement être imputée aux méthodes et à la fréquence de l'échantillonnage, ainsi qu'au mode de calcul des flux. Pour l'avenir, il faudrait définir une méthodologie commune, afin de pouvoir comparer les résultats, et être ainsi en mesure d'apprécier la variabilité amont-aval des flux sédimentaires.

Références citées

- BORDAS, M.P., LANNA, A.E. & SEMMELMANN, F.R., 1988 - Évaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires. *in: Sediment Budgets* (M.P. Bordas & D.E. Walling eds.) : 359-368 ; IAHS Publ. 174.
- BOURGES, J., HOORELBECKE, R., CORTEZ, J. & CARRASCO, L.M., 1993 - Los regímenes hidrológicos de la cuenca amazónica de Bolivia *in: Seminario sobre el PHICAB* (M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz eds) : 125-134; La Paz: ORSTOM/ SENAMHI/UMSA.
- DNAEE-CGRH/ORSTOM, (1994) - Mapa de disponibilidade hídrica da Bacia Amazônica do Brasil. Publ. DNAEE-CGRH Brasília.
- 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.

- FILIZOLA, N. & GUYOT, J.L., 1994 - The DNAEE sedimentometric network, Amazon region, Brazil. in: *Sediment quality monitoring and assessment*: 26-31; Buenos Aires: GEMS.
- 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. *Geological Society of America Bulletin*, 78: 1203-1232.
- GUYOT, J.L., 1993 - Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne, 261 p., Collection Études & Thèses, ORSTOM, Paris.
- GUYOT, J.L., BOURGES, J. & CORTEZ, J., 1994 - Sediment transport in the Rio Grande, an Andean river of the Bolivian Amazon drainage basin. in: *Variability in stream erosion and sediment transport* (R.J. Olive & D. Loughran eds.): 223-231; Canberra: IAHS Publ. 224.
- 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 Beni, Bolivie. in: *Sediment Budgets* (M.P. Bordas & D.E. Walling eds.): 443-451; Porto Alegre: IAHS Publ. 174.
- MARTINELLI, L.A., DEVOL, A.H., FORSBERG, B.R., VICTORIA, R.L., RICHEY, J.E. & RIBEIRO, M.N., 1989 - Descarga de sólidos disueltos totales do Rio Amazonas e seus principais tributários. *Geochim. Brasil.*, 3(2): 141-148.
- MARTINELLI, L.A., FORSBERG, B.R., VICTORIA, R.L., DEVOL, A.H., MORTATTI, J., FERREIRA, J.R., BONASSI, J. & DE OLIVEIRA, E., 1993 - Suspended sediment load in the Madeira river. *Mitt. Geol.-Paläont. Inst. Univ. Hamburg, Sonderband* 74: 41-54.
- MEADE, R.H., 1994 - Suspended sediments of the modern Amazon and Orinoco rivers. *Quaternary International*, 21: 29-39.
- 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.
- 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.
- MOLINIER, M., GUYOT, J.L., CALLÈDE, J., OLIVEIRA, E. de, GUIMARÃES, V., CUDO, K.J. & AQUINO, M. de, 1993 - Hidrología de la cuenca amazónica brasilera: HIBAM. Primeros resultados sobre la cuenca del Río Madeira. in: *Seminario sobre el PHICAB* (M.A. Roche, J. Bourges, E. Salas & C. Diaz eds.): 155-164; La Paz: ORSTOM/SENAMHI/ UMSA.
- MOLINIER, M., GUYOT, J.L., OLIVEIRA, E. de, GUIMARÃES, V. & CHAVES, A., 1994 - Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. *A Água em Revista*, 2(3): 31-36.
- MORTATTI, J., FERREIRA, J.R., MARTINELLI, L.A., VICTORIA, R.L. & TANCREDI, A.C.F., 1989 - Biogeochemistry of the Madeira river basin. *Geofournal*, 19(4): 391-397.
- MORTATTI, J., PROBST, J.L. & FERREIRA, J.R., 1992 - Hydrological and geochemical characteristics of the Jamari and Jiparana river basins (Rondonia, Brazil). *Geofournal*, 26(3): 287-296.
- 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. *Water Resources Research*, 22(5): 756-764.
- ROCHE, M.A. & FERNÁNDEZ, C., 1988 - Water Resources, Salinity and Salt Yields of the Rivers of the Bolivian Amazon. *Journal of Hydrology*, 101: 305-331.
- ROCHE, M.A., FERNÁNDEZ, C., ALIAGA, A., PEÑA, J., SALAS, E. & MONTAÑO, J.L., 1992 - Balance hídrico de Bolivia, 16 p., La Paz: Publ. PHICAB.
- SIOLI, H., 1984 - The Amazon and its main affluents : Hydrography, morphology of the river courses, and river types. in: *The Amazon* (H. Sioli ed.): 127-165; W. Junk, Dordrecht.