

Exportation de matières en suspension des Andes vers l'Amazonie par le Rio Beni, Bolivie

J. L. GUYOT, J. BOURGES, R. HOORELBECKE,
M. A. ROCHE

Mission ORSTOM, CP 8714, La Paz, Bolivie

H. CALLE, J. CORTES

Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrologia, CP 996, La Paz, Bolivie

M. C. BARRAGAN GUZMAN

UMSA, Instituto de Hidraulica e Hidrologia, CP 303, La Paz, Bolivie

Résumé Avec une superficie de 282 000 km² et un module de 9300 m³ s⁻¹, le Rio Béni est, avec le Rio Mamoré, un des deux principaux formateurs du Rio Madeira. Une grande partie du bassin versant du Rio Béni (40%) est située dans la cordillère orientale des Andes. A la sortie des Andes, le Rio Béni présente un flux d'exportation de sédiments de 191 × 10⁶ t an⁻¹. Avec les apports de ses principaux affluents, le Rio Béni, à son confluent avec le Rio Mamoré, apporte au Rio Madeira 149 × 10⁶ t an⁻¹ de matières en suspension, soit un taux d'érosion mécanique global de 527 t km⁻² an⁻¹ pour l'ensemble de son bassin versant.

Sediment discharge from the Andes to the Amazonia along the Beni River

Abstract With a 282 000 km² area and a 9300 m³ s⁻¹ mean discharge, the Rio Beni is, with the Rio Mamore, one of the most important rivers which forms the Rio Madeira. A large part of the Beni River drainage basin (40%) lies in the Andes Eastern Cordillera. At the foothills of the Andes, the sediment discharge of the Rio Beni is 191 × 10⁶ t year⁻¹. With the supply of its main affluents, the Rio Beni, at its confluence with the Rio Mamore, carries 149 × 10⁶ t year⁻¹ of sediment to the Rio Madeira. It amounts to a global mechanical erosion rate of 527 t km⁻² year⁻¹ for the whole drainage basin.

INTRODUCTION

L'évaluation des quantités de sédiments en suspension et la caractérisation du régime de ces exportations par le Rio Béni, depuis les têtes du bassin andin jusqu'au Rio Madeira, ont été réalisées en Bolivie. L'étude a été menée dans

le cadre du PHICAB (Programme Hydrologique et Climatologique de Bolivie, projet ORSTOM/SENAMHI/IHH). Les mesures hydrométriques et de charges en suspension proviennent de huit stations du SENAMHI pour la zone andine et de cinq stations du réseau PHICAB pour la plaine amazonienne (Tableau 1). Il s'agit des premiers résultats présentés qui, compte tenu de la variabilité des périodes d'observation et d'une certaine hétérogénéité des données, seront précisés avec la continuation des observations sur le réseau PHICAB.

Tableau 1 Caractéristiques des stations hydrométriques

Code station	Station	Rio	Altitude (m)	Superficie (km ²)	Organisation	Période d'observation
SI	Sirupaya	Unduavi	1800	272	SENAMHI	83-86
UN	Puente Villa	Unduavi	1200	359	SENAMHI	83-85
TQ	Puente Villa	Taquesi	1200	595	SENAMHI	83-85
TM	Puente Villa	Tamampaya	1185	954	SENAMHI	75-85
VB	Villa Barrientos	Tamampaya	1050	1 440	SENAMHI	75-84
AQ	Angosto					
	Quercano	Mapiri	600	10 600	SENAMHI	75-79
SR	Santa Rita BA	Coroico	435	4 700	SENAMHI	76-77
AI	Agnosto Inicua	Alto-Béni	420	29 600	SENAMHI	75-84
AB	Angosto del Bala	Béni	284	67 200	SENAMHI/ PHICAB	75-87
PC	Portachuelo	Béni	140	119 000	PHICAB	83-87
MF	Miraflores	Madre Dios	140	124 000	PHICAB	83-87
CA	Caracoles	Orthon	130	32 300	PHICAB	83-87
CE	Cachuela Esper.	Béni	124	282 000	PHICAB	83-87

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT

Le Rio Béni, avec le Rio Mamoré, forme le Rio Madeira, le plus grand des affluents méridionaux de l'Amazone. A sa confluence avec le Rio Mamoré, près de Cachuela Esperanza, le Rio Béni draine un bassin versant de 282 000 km², dont 40% sont situés dans la Cordillère orientale des Andes boliviennes et péruviennes (Abasto Lara, 1987; Espinoza Torrico, 1985). L'ensemble du bassin du Rio Béni se subdivise en plusieurs sous-bassins, les principaux étant (Fig. 1): le Béni avant Riberalta à sa confluence avec le Madre de Dois (122 400 km²), le Madre de Dois (125 000 km² dont 76% situés au Pérou) et l'Orthon (32 400 km² dont 38% situés au Pérou).

Les reliefs sont extrêmement contrastés, avec des points culminants approchant les 6500 m dans la Cordillère Royale (Illimani, Illampu, ...) et une altitude de l'ordre de 130 m au confluent avec le Rio Madre de Dios. Le bassin versant se divise ainsi en une zone andine à fort gradient et une plaine amazonienne (Llanos) à très faible pente (Fig. 2).

Sur l'ensemble de la zone d'étude, la pluviométrie moyenne est estimée à 1930 mm avec une valeur de 1800 mm en plaine et de 1500 à 2000 mm dans les Andes (Roche *et al.*, 1986), où localement des valeurs de 4000 mm ont été observées à la partie supérieure des vallées chaudes (Yungas).

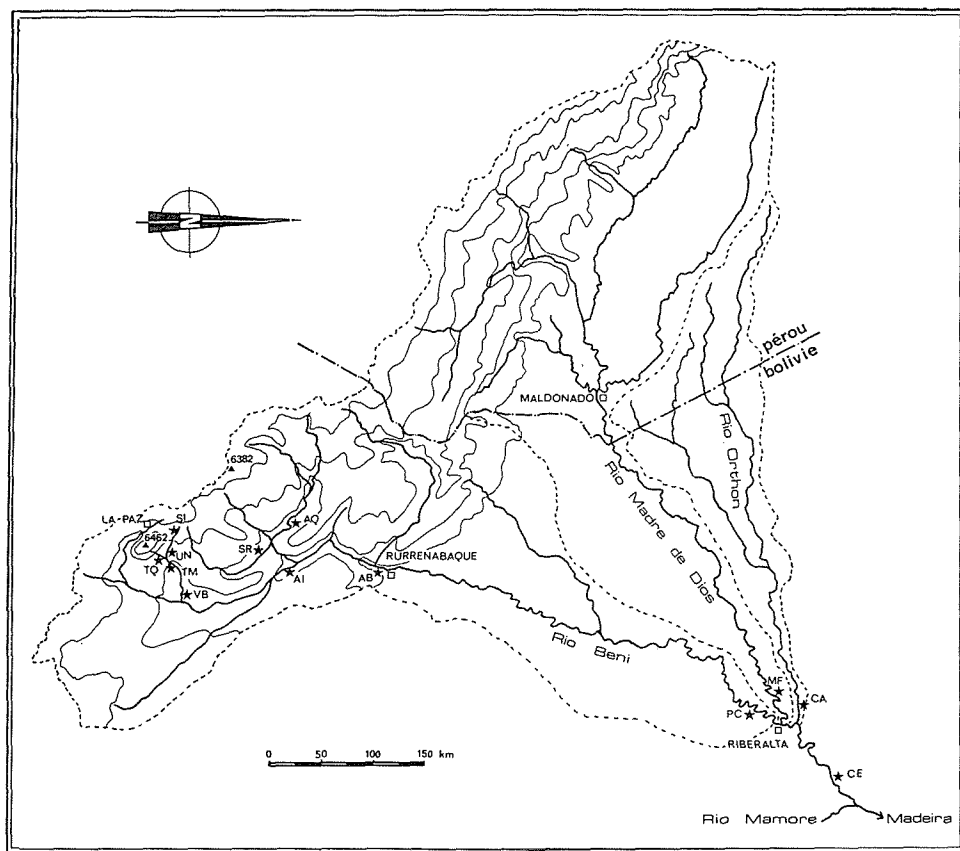


Fig. 1 Présentation géographique. Code des stations voir Tableau 1.

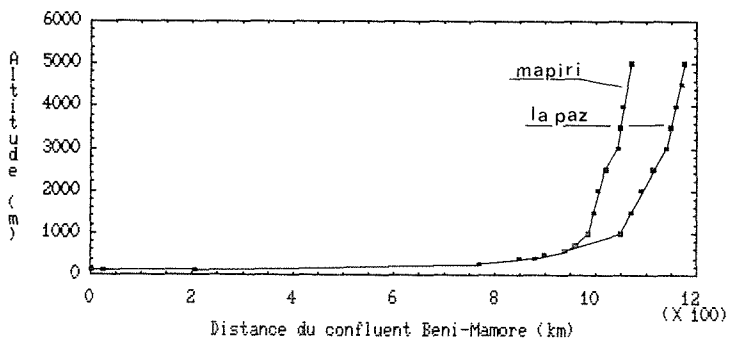


Fig. 2 Profil en long du Rio Béni à Riberalta.

La végétation passe rapidement des couvertures inexistantes ou rases en altitude à la forêt tropicale humide parfois clairsemée de savane dans la plaine.

Il existe deux domaines géologiques distincts. En amont, les Andes essentiellement constituées de séries détritiques du Paléozoïque avec quelques

lambeaux du Mésozoïque, ainsi que des massifs intrusifs (granites et granodiorites) formant les sommets de la Cordillère Royale. Des sédiments du Cénozoïque comblent le fond des vallées situées dans la partie basse des Andes (Tuichi, Quiquibey, Quendeque, Alto-Béni, ...). En aval, la plaine est entièrement occupée par des sédiments quaternaires et plio-quaternaires.

LES REGIMES HYDROLOGIQUES

Sous l'influence du même régime pluviométrique, les régimes hydrologiques montrent une distribution des débits mensuels semblable dans les Andes et dans la plaine amazonienne. A une période de hautes eaux de décembre à avril, s'oppose une période de basses eaux de mai à novembre (Fig. 3).

Pour certaines stations, le module correspondant à la période d'observation des matières en suspension est sensiblement différent du module calculé sur des chroniques plus longues. Ainsi pour le Rio Béni à Cachuela Esperanza, le débit moyen de la période d'étude (1983-1987) est de $9300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ alors que pour la période 1968-1986, il est de $8050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Bourges, 1987).

Dans les Andes, les débits maxima sont observés de janvier à mars, alors que dans la plaine, la période de hautes eaux se poursuit jusqu'en avril, et éventuellement jusqu'en mai comme à Caracoles. Les trois mois de hautes eaux (janvier, février, mars) représentent de 58% (Rio Tamampaya à Villa Barrientos) à 36% (Rio Orthon à Caracoles) de l'écoulement annuel, avec une valeur de 53% à la sortie des Andes (Rio Béni à Angosto del Bala) et de 45% à Cachuela Esperanza.

Les débits minima observés sur les stations andines se situent en juillet-août, quelquesfois en juin, alors qu'en plaine c'est en août-septembre, ou même en octobre quand sont enregistrés les plus bas niveaux. Les trois mois de basses eaux (juillet, août, septembre) représentent de 7% (Rio Tamampaya à Villa Barrientos) à 14% (Rio Orthon à Caracoles) de l'écoulement annuel, avec une valeur de 9% pour le Rio Béni à Angosto de Bala et de 10% à Cachuela Esperanza.

La moitié des apports hydriques annuels provenant des Andes est donc exporté durant les trois mois les plus pluvieux. Cette répartition est ensuite atténuée vers l'aval avec l'apport des fleuves de plaine tel que le Rio Orthon.

Le Rio Madre de Dios a un régime intermédiaire à celui du Rio Orthon et du Rio Béni à Riberalta. En effet la partie andine de son bassin versant ne représente que 34% alors que pour le Rio Béni à Riberalta, cette même partie andine correspond à 60% du bassin.

LES MATIERES EN SUSPENSION

Les données provenant des réseaux du SENAMHI et du PHICAB, sont obtenues à partir d'échantillons prélevés à l'aide d'un intégrateur sur plusieurs verticales, de 3 à 12 suivant la largeur du cours d'eau (Tableau 2).

L'évolution des teneurs en matières en suspension suit grossièrement l'évolution des débits (Fig. 4). Les maxima de débit solide coïncident donc

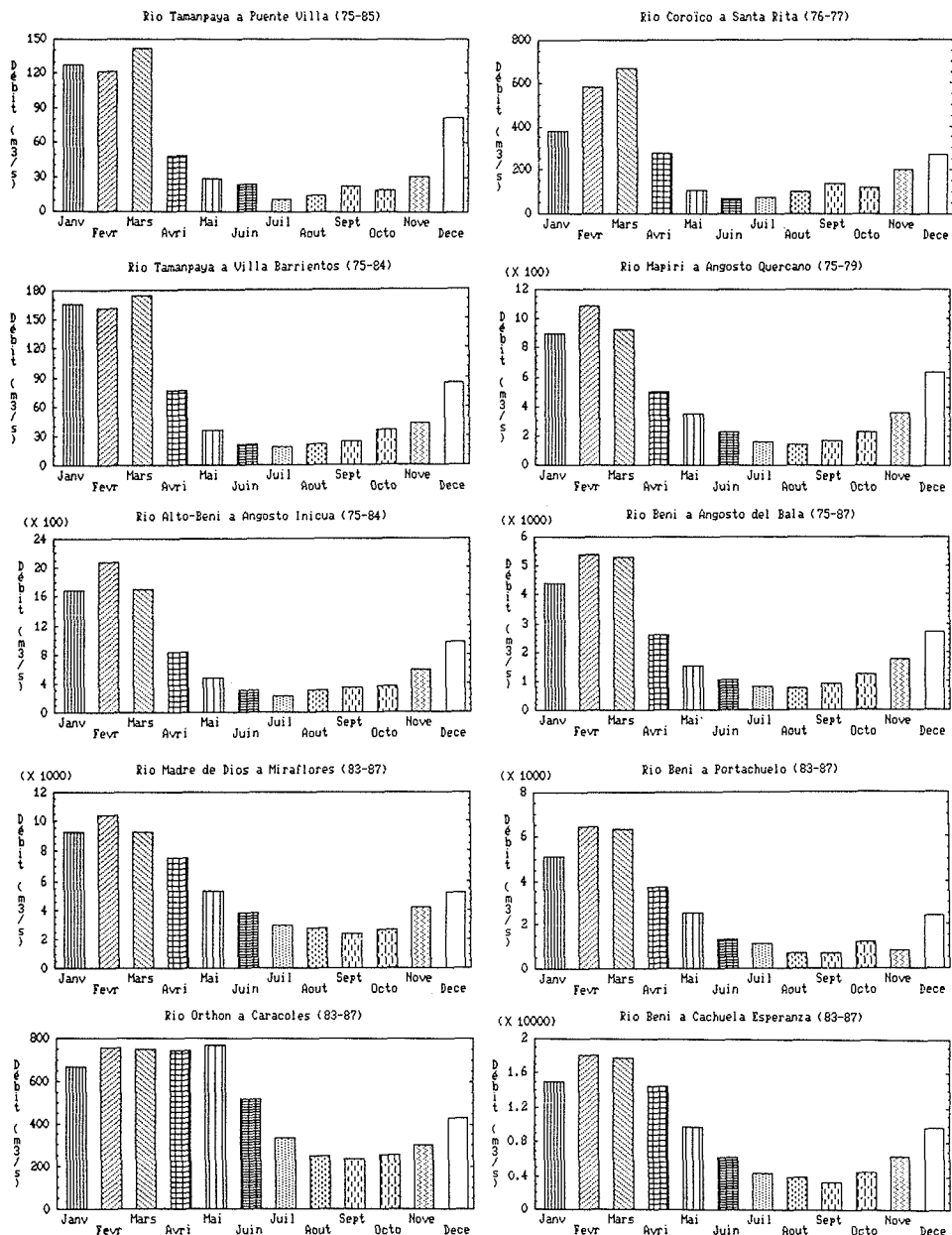


Fig. 3 Régime hydrologique aux différentes stations.

avec les maxima hydrologiques, les périodes de hautes eaux fournissant ainsi la plus grande partie des sédiments.

L'étude de la distribution des volumes mensuels de sédiments exportés (Fig. 5), montre que l'essentiel du débit solide se produit de décembre à avril en période de hautes eaux avec des valeurs oscillant de 86% (Rio Tamampaya à Villa Barrientos) à 95% (Rio Coroico à Santa Rita) du volume global

Tableau 2 Principaux résultats de transport solide par station

Code station	Débit moyen ($m^3 s^{-1}$)	MES ($mg l^{-1}$)	Débit solide ($10^8 t an^{-1}$)	Taux d'érosion ($t km^{-2} an^{-1}$)
SI	(16)	2790	(1.4)	(5180)
UN	(21)	1080	(0.7)	(1980)
TQ	(35)	281	(0.3)	(521)
TM	56	801	1.6	1660
VB	72	1950	8.6	6000
AQ	475	1930	48	4540
SR	250	589	5.1	1090
AI	825	1920	103	3460
AB	2340	1350	191	2840
PC	2800	886	123	1040
MF	5410	312	61	489
CA	477	132	1.8	55
CE	9310	363	149	527

Les valeurs entre parenthèses sont des valeurs estimées.

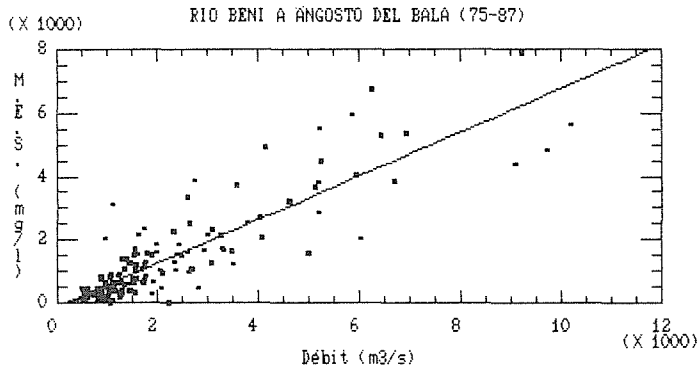


Fig. 4 $MES = f(\text{débit})$.

annuel pour les Andes, et de 70% (Rio Orthon à Caracoles) à 93% (Rio Béni à Portachuelo) pour la plaine.

Dans les Andes, le phénomène est encore plus marqué si l'on ne prend en considération que les trois mois de janvier, février et mars qui fournissent de 69% (Rio Tamampaya à Puente Villa) à 86% (Rio Alto-Béni à Angosto Inicua) du volume annuel de sédiments. Par contre, lors de la période de basses eaux, de mai à novembre, ces sept mois ne participent que de 5% (Rio Coroico à Santa Rita) à 14% (Rio Tamampaya à Villa Barrientos) du débit solide annuel.

L'évolution des régimes de sédiments de l'amont vers l'aval, est analogue à celle observée pour les régimes hydrologiques: la traversée des llanos se traduit par une régulation du régime des matières en suspension et une distribution plus homogène des teneurs (Guyot, 1986).

Le flux maximum de sédiments est observé à la sortie des Andes ($191 \times 10^6 t an^{-1}$ à Angosto del Bala), ce qui représente un taux moyen d'érosion mécanique de la Cordillère de $2840 t km^{-2} an^{-1}$. Des taux supérieurs sont observés sur des bassins de moindre importance comme le Rio Tamampaya, le

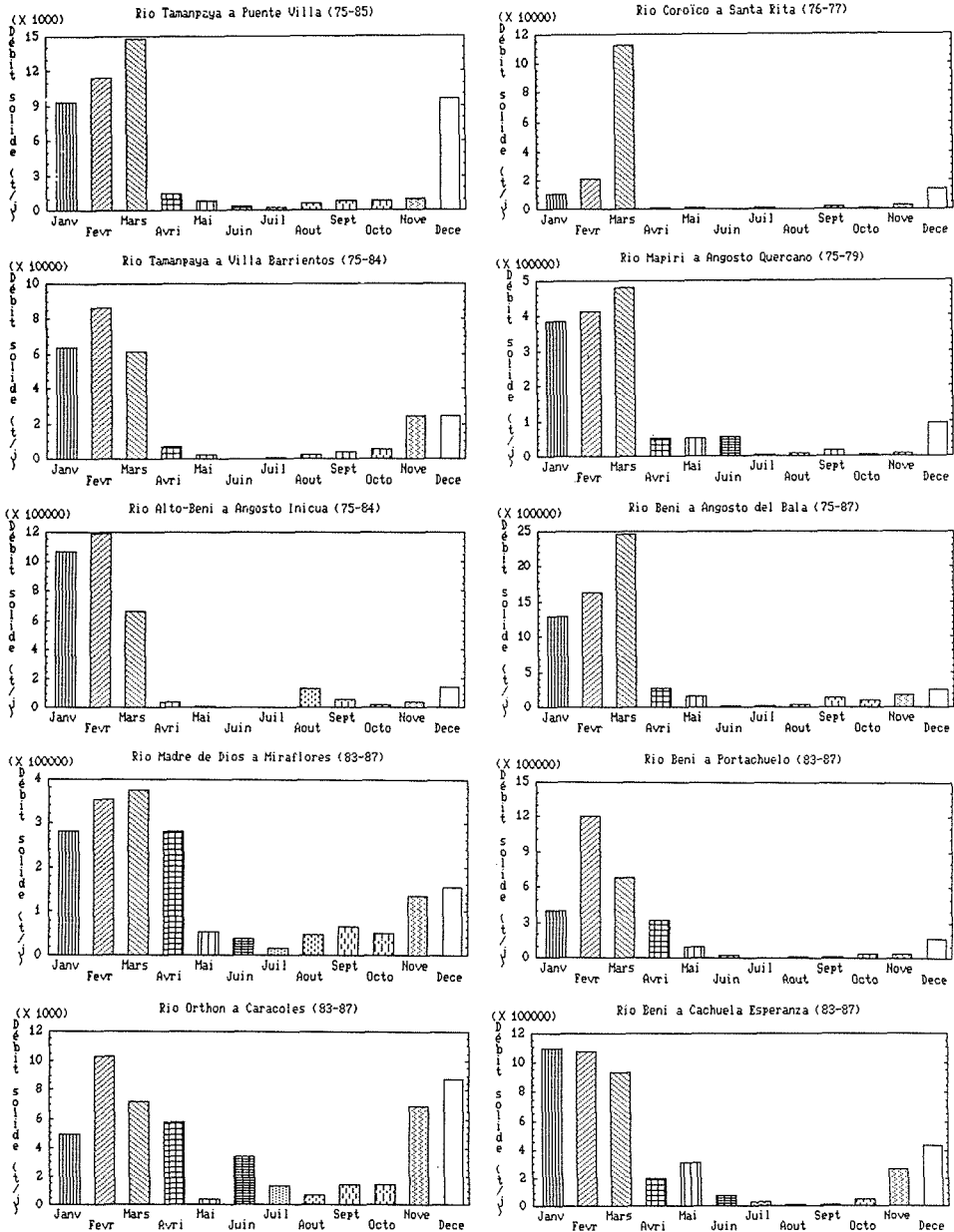


Fig. 5 Régime des débits solides aux différentes stations.

Rio Mapiri et le Rio Alto-Béni, c'est-à-dire dans la partie amont du système qui correspond à une zone à plus forte pluviosité, à forte pente et à couvert végétal réduit, donc à plus forte érodabilité potentielle (Fig. 6). Le maximum est obtenu à Villa Barrientos sur le Rio Tamampaya ($6000 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$) et le minimum sur le Rio Coroico à Santa Rita de Buenos Aires ($1090 \text{ t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$).

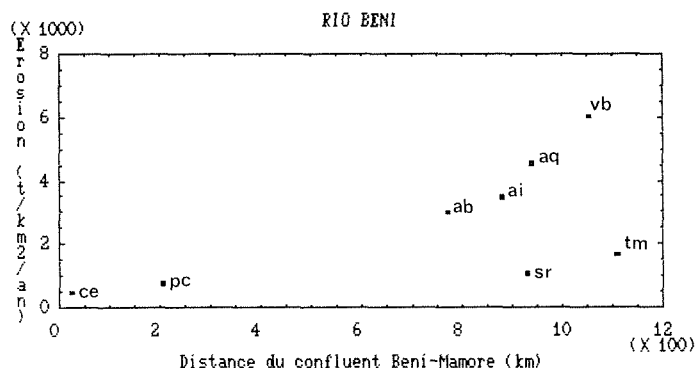


Fig. 6 Taux d'érosion = $f(\text{distance à l'embouchure})$. Code des stations voir Tableau 1.

En plaine ces taux d'érosion diminuent sous le double effet de la dilution par les affluents de forêt tel que le Rio Orthon et la sédimentation. Ainsi le Rio Béni à Portachuelo, c'est-à-dire après un parcours d'environ 600 km dans la plaine, présente un flux de $123 \times 10^6 \text{ t an}^{-1}$ et le Rio Madre de Dios $61 \times 10^6 \text{ t an}^{-1}$. La poursuite des observations sur le réseau PHICAB va permettre de préciser les taux de sédimentation en plaine amazonienne. Le Rio Béni, à la confluence avec le Rio Mamoré, apporte au Rio Madeira $149 \times 10^6 \text{ t}$ de sédiments en suspension par an, soit 7.8 fois plus que l'exportation de matières dissoutes (Roche & Fernandez, 1988).

Le volume de sédiments exportés par le Rio Béni pour la période 1983–1987, correspond à 95% des volumes observés sur le Rio Madeira à sa confluence avec l'Amazone, et à 30% de ceux de l'Amazone à son embouchure (Gibbs, 1967). Par contre en utilisant les données récentes (Meade *et al.*, 1979; Richey *et al.*, 1986), ces pourcentages passent respectivement à 34% et 13 à 16%, ce qui montre la difficulté de comparer des données d'une même station correspondant à des modes de prélèvement différents et des périodes différentes.

Tableau 3 Taux d'érosion (1983–1987)

Code station	Milieu	Erosion chimique ^a ($\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$)	Erosion mécanique ($\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$)	Erosion totale ^b ($\text{t km}^{-2} \text{ an}^{-1}$)
AB	Andes	83	2180*	2260
PC	Andes + Amazonie	64	1040	1100
MF	Andes + Amazonie	75	489	564
CA	Amazonie	19	55	74
CE	Andes + Amazonie	68	527	595
Madeira ^b		42	157	199
Amazone ^b		37	79	116

^a d'après Guyot et al. (1988).

^b d'après Gibbs (1967).

*Valeur différente de celle du Tableau 2 portant sur la période 1975–1987.

Avec des taux d'érosion totale élevés, il apparaît que l'érosion mécanique est nettement prépondérante dans les Andes boliviennes (Tableau 3). A Angosto del Bala, l'érosion chimique ne représente que 3.7% de l'érosion globale. Ce taux passe à 5.8% à Portachuelo, puis à 11.4% à Cachuela Esperanza traduisant le plus faible apport relatif en sédiments du Madre de Dios et de l'Orthon.

CONCLUSION

Avec des taux d'érosion variables dans les différentes vallées andines (de 1000 à 6000 t km⁻² an⁻¹) dus aux conditions topographiques, géologiques, pluviométriques et de végétation, le Rio Béni à Angosto del Bala fournit au milieu amazonien, pour la période de 1983 à 1987, un flux de sédiments de l'ordre de 400 000 t jour⁻¹. L'ensemble des exportations d'ions et de suspensions correspond à un taux global des Andes de 2260 t km⁻² an⁻¹, l'un des plus importants observés dans les Andes.

Finalement, à sa confluence avec le Rio Mamoré, le Rio Béni et ses principaux affluents, le Madre de Dios et l'Orthon, apportent au Rio Madeira un débit solide de 407 000 t jour⁻¹.

La poursuite des observations et mesures du réseau PHICAB dans l'ensemble de l'Amazonie bolivienne devrait permettre de préciser lors des prochains cycles hydrologiques, l'ampleur de ces phénomènes d'érosion dans les Andes et de sédimentation dans la plaine, de ce haut bassin versant de l'Amazone.

REFERENCES

- Abasto Lara, N. (1987) Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Madre de Dios. Tesis de grado UMSA La Paz. Publ. PHICAB.
- Bourges, J. (1987) Projet de Cachuela Esperanza. Etude sommaire des débits. Publ. PHICAB.
- Espinoza Torrico, O. (1985) Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Béni. Tesis de grado UMSA La Paz. Publ. PHICAB.
- Gibbs, R. (1967) The geochemistry of the Amazon River system. *Geol. Soc. Am. Bull.* 78, 1203-1232.
- Guyot, J. L. (1986) Evolucion en el espacio y el tiempo de las concentraciones de materia en solucion y en suspension, de las aguas de la cuenca amazonica de Bolivia. *Actas del Primero Simposio de la Investigacion Francesa en Bolivia* (La Paz, Septiembre 1986), 48-53.
- Guyot, J. L., Roche, M. A. & Bourges, J. (1988) Etude de la physico-chimie et des suspensions des cours d'eau de l'Amazonie bolivienne: l'exemple du Rio Béni. *Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, septembre 1988.*
- 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.
- 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. *Wat. Resour. Res.* 22 (5), 756-764.
- Roche, M. A., Fernandez, C., Apoteker, A., Abasto, N., Calle, H., Toledo, M., Cordier, J. P. & Pointillart, C. (1986) Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Publ. PHICAB.
- Roche, M. A. & Fernandez, C. (1988) Water resources, salinity and salt yields of the rivers of the Bolivian Amazon. *J. Hydrol.*

