

Variations spatio-temporelles du bilan sédimentaire dans le bassin Amazonien Brésilien, à partir d'un échantillonnage décadaire

ALAIN LARAQUE¹, NAZIANO FILIZOLA² & JEAN LOUP GUYOT³

¹ IRD-LMTG, OBHI, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France
alain.laraque@mpl.ird.fr

² ANA, SPO area hh5, cuadro 3, A05, Qd. 03, CEP 70610-200, Brasília DF, Brésil

³ IRD-LMTG, Casilla 18-1209, Lima 18, Pérou

Résumé L'objectif de cette étude est de caractériser les variations spatiales du transport sédimentaire dans le bassin amazonien brésilien, pour la période 1998–2003, à partir des données décennales de 11 stations de références, situées sur les principaux tributaires de l'Amazone. Les relations entre les concentrations décennales de surface et les concentrations moyennes dans la section de jaugeage, provenant des campagnes de mesures HyBAm, sont utilisées pour estimer les flux moyens dans la section. Les taux de transfert spécifiques varient de 10 à 560 t km⁻² an⁻¹ et mettent en évidence des variations spatiales significatives entre les parties amont correspondant aux zones montagneuses (eaux blanches), celles des boucliers brésiliens et guyanais (eaux claires) et celles des basses plaines d'inondations (eaux noires). Ensuite, les bilans sédimentaires, de l'amont vers l'aval, des principaux tributaires de l'Amazone ont permis d'identifier des zones de transfert sédimentaire, d'érosion et de dépôt. D'important secteurs de sédimentation ont été identifiés le long du Rio Madeira et de l'Amazone. Ainsi, environ 20% du flux sédimentaire total provenant des Rios Negro, Solimões et Madeira, est déposé en amont d'Óbidos, la dernière et plus importante station de jaugeage sur l'Amazone. La variabilité temporelle de ces processus au pas de temps mensuel est aussi étudiée.

Mots clés Amazonie; Brésil; flux sédimentaire; hydrologie; matières en suspension; sédimentation

The spatial and temporal variability of sediment transport in the Brazilian Amazon basin, based on a regular 10-day sampling programme

Abstract The aim of this study was to characterize the spatial distribution of sediment yields and sediment transfer processes in the Brazilian Amazon basin during the period 1998–2003. For this purpose, the HyBAm project organized a regular 10-day sampling programme at 11 gauging stations on the major tributaries of the Amazon River, for measuring surface suspended sediment concentrations. The relationships between surface concentration and the mean suspended sediment concentration in the gauging section cross section derived from HyBAm field measurements were used to estimate the mean sediment concentration in the cross-section. Combination of these data with the discharge record made it possible to calculate the sediment loads and the specific sediment yields for these stations. The specific sediment yields ranged from 10 to 560 t km⁻² year⁻¹ and evidence significant spatial contrasts between the upstream areas, draining mountainous areas (white water), and the downstream Amazonian flood plain areas (black and clear water). Upstream–downstream suspended sediment budgets for the major tributaries (six stations) were used to identify zones of sediment transfer, erosion and

deposition. Important sediment deposition zones were identified along the Amazon River. Thus, about 20% of the suspended sediment yield from the Negro/Solimões/Madeira rivers was deposited upstream of Obidos, the lowest operational gauging station on the Amazon River. The temporal variability of these processes at the monthly time scale is also investigated.

Key words Amazon Basin; Brazil; deposition; hydrology; sediment flux; suspended sediment

INTRODUCTION

Les Andes fournissent 95% des sédiments exportés à l'océan atlantique par l'Amazone (Guyot, 1993). Pourtant cette Cordillère ne couvre que 12% de la superficie de son bassin versant. C'est initialement pour tenter de comprendre son fonctionnement hydrosédimentologique que le programme international HyBAm (Hydrologie et Géodynamique actuelle bassin Amazonien) a été lancé en 1994 en collaboration entre la France, le Brésil, la Bolivie, l'Equateur et le Pérou. Ce programme scientifique étudie de manière intégrée les aspects climatologiques, hydrologiques, sédimentologiques, géochimiques et géodynamique du bassin amazonien. En hydrosédimentologie, il s'applique à identifier la répartition spatiale des zones érodables, de transport et de dépôts sédimentaires afin de comprendre les processus de transfert de matières au sein de la plaine amazonienne, dont la majeure partie se trouve en territoire brésilien. Cette étude se base sur les observations, mesures et prélèvements récoltés sur un réseau de six stations de références réparties en des endroits stratégiques de ce bassin (Tableau 1) durant la période 1998–2003. Ce réseau est géré par l'ANA et l'IRD dans le cadre d'un accord entre l'ANA, l'UnB, le CNPq et l'IRD.

Tableau 1 Présentation des bassins et stations étudiés (modules pour les périodes 1998–1999 et 2002–2003).

Code	Fleuve / Station	Lat.	Long.	Superficie (km ²)	Module (m ³ s ⁻¹)
TAB	Rio Solimões à Tabatinga	-4.16	-59.16	991 700	51 000
MAN	Rio Solimões à Manacapuru	-3.32	-60.58	2 147 700	108 000
PAR	Rio Negro à Paricatuba	-1.24	-61.45	696 800	37 000
PTV	Rio Madeira à Porto Velho	-8.77	-63.92	954 300	16 840
FVA	Rio Madeira à Fazenda Vista Alegre	-4.90	-60.02	1 324 700	19 000
OBI	Rio Amazonas à Óbidos	-1.90	-55.50	4 618 800	175 000

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le bassin amazonien (Fig. 1), le plus vaste de la planète avec ses 6.1×10^6 km² est constitué de quatre grandes unités physiographiques. A l'ouest, la Cordillère des Andes culminant à 7000 m d'altitude, apporte à l'Amazone des eaux "blanches" riches en MES par deux principaux tributaires que sont le Solimões et le Madeira. Au nord et au sud, les boucliers guyanais et brésiliens fournissent des eaux "claires" très peu minéralisées et peu chargées en MES et enfin, la plaine centrale essentiellement couverte d'une dense forêt pluviale est drainée par des eaux de ruissellement du type "eaux noires", peu minéralisées mais très riches en carbone organique particulaire et

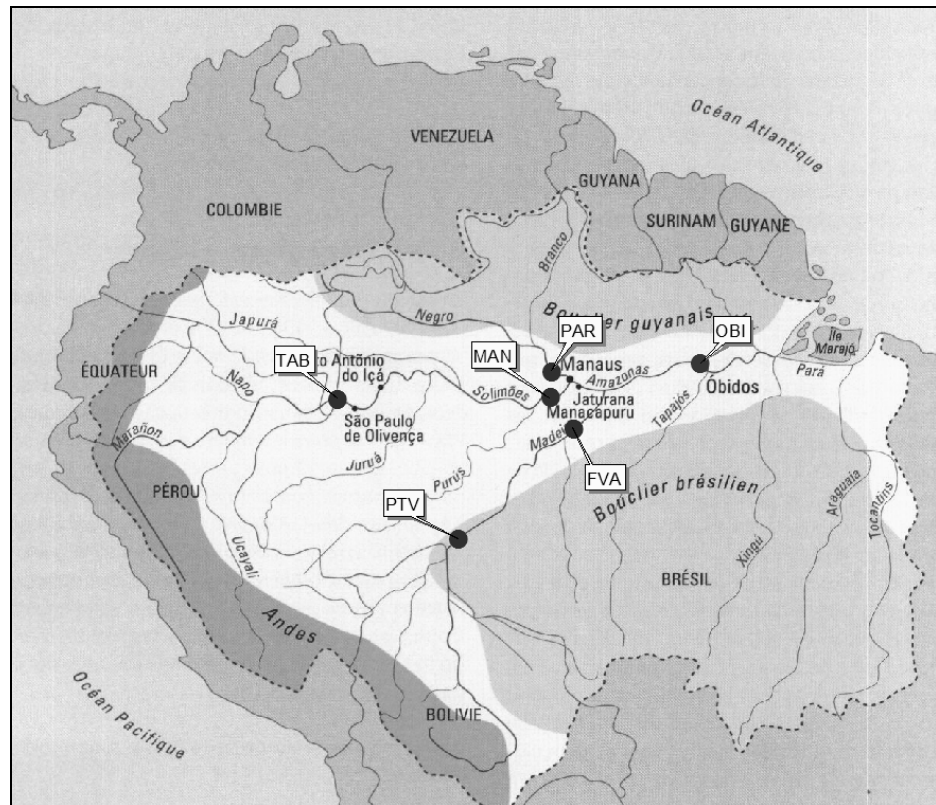


Fig. 1 Localisation des stations étudiées dans le bassin amazonien (voir Tableau 1 pour le code des stations)

dissous et très acides (pH \sim 4). Son stéréotype est celui du Rio Negro. La pluviométrie moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin s'élève à 2460 mm (Salati *et al.*, 1978; Hiez *et al.*, 1991; Molinier *et al.*, 1991), avec d'importantes variations spatiales (entre 100 et 8000 mm), rencontrées essentiellement dans la cordillère des Andes (Laraque *et al.*, 2004). La végétation est à plus de 70% composée par la forêt tropicale humide. Les régimes hydrologiques des principaux tributaires de l'Amazonie se conjuguent pour donner naissance à une crue unique très lissée et étalée sur huit mois (de février à septembre) à la station d'Óbidos, la principale station de l'Amazonie (Fig. 4(c)). Les principaux sous bassins étudiés ici ont des superficies allant de 700 000 à 4 620 000 km². Ils sont présentés avec leurs stations de contrôle, dans le Tableau 1.

DONNEES ET METHODES

Les six stations de références brésiliennes contrôlent à la fois les principaux apports andins entrant dans la plaine amazonienne brésilienne ainsi que leur évolution le long de ces grands axes fluviaux. Il s'agit des tronçons:

- de 1550 km du Rio Madeira, situé entre la station amont de Porto Velho contrôlant les entrées hydrosédimentaires au Brésil en provenance de Bolivie et celle de Fazenda Vista Alègre juste en amont de sa confluence avec l'Amazonie;
- de 840 km du Rio Solimões, situé entre la station amont de Tabatinga, contrôlant les apports au Brésil en provenance du Pérou, d'Equateur et de Colombie, et celle

de Manacapuru juste en amont de sa confluence avec le Rio Negro pour former l'Amazone au niveau de la ville de Manaus;

- et enfin de celui de 650 km de l'Amazone, situé entre les confluences des Rios Negro, Solimões et Madeira (c'est à dire correspondant aux apports des stations de Manacapuru, Paricatuba et Fazenda Vista Alegre) et la station d'Óbidos, la dernière et principale station hydrologique du bassin.

Comme la station de Tabatinga sur le Rio Solimões ne possède pas de courbe d'étalonnage, nous avons utilisé les débits de la station São Paulo de Olivença située un peu plus en aval (250 km) puisqu'il n'y a pas d'arrivée de tributaires d'importance entre ces deux stations.

Toutes ces six stations bénéficient de prélèvements de MES décennaires depuis fin 1997, excepté pour Óbidos et Porto Velho dont les chroniques remontent à 1995. Par contre ces chroniques sont entachées de lacunes. Afin d'établir des bilans amont-aval tenant compte le plus possible de la réalité terrain, il nous a fallu sélectionner des périodes communes d'observations les plus complètes possibles. Deux périodes annuelles ont ainsi pu être étudiées et comparées pour calculer les flux annuels de MES inter stations sur ces trois tronçons.

Il s'agit des périodes allant de mai 1998 à avril 1999 puis de mars 2002 à février 2003 pour les stations Porto Velho (PTV), Manacapuru (MAN), Paricatuba (PAR), Óbidos (OBI) et Fazenda Vista Alegre (FVA). Ces quatre dernières stations permettent d'étudier les processus hydrosédimentaires annuels et saisonniers qui se produisent sur un profil en long de l'Amazone, situé entre, à l'amont la somme des confluences des Rios Negro, Solimões et Madeira (MAN+PAR+FVA) et à l'aval les flux transitant sur l'Amazone à la station d'Óbidos (OBI).

Quant au profil en long du Solimões situé entre Tabatinga (TAB) et Manacapuru (MAN), ses bilans hydrosédimentaires ont pu être étudiés entre Novembre 1998 et Octobre 1999 (Tabatinga n'avait pas de données antérieures à octobre 1998) et ensuite entre mars 2002 et février 2003.

Les relations entre les prélèvements de surface décennaires réalisés par un observateur et la moyenne dans les sections d'étude (Fig. 2) sont établies grâce à des jaugeages solides complets répartis sur tout le cycle hydrologique (Filizola, 2003). Ces derniers se réalisent au travers d'un protocole d'échantillonnage point par point. Dans chaque section de jaugeage, n échantillons sont récoltés sur toute la profondeur de p verticales, uniformément

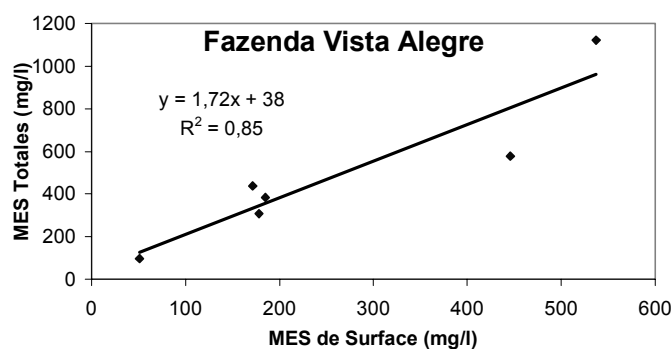


Fig. 2 MES moyenne dans section vs MES de surface Rio Madeira à Fazenda Vista Alegre.

réparties sur l'ensemble de la section (avec $3 < (n, p) < 8$). Les concentrations ponctuelles sont alors pondérées par les vecteurs vitesses correspondant aux points de prélèvements répartis dans toute la section de mesure. Les prélèvements sont filtrés avec des filtres d'acétate de cellulose de $0.45 \mu\text{m}$ pour séparer les matières en suspension (MES).

Comme en général les relations liant les MES aux débits ne sont pas univoques, (Filizola, 2003), nous ne pouvons calculer les flux mensuels de MES par des relations simples du type $\text{FMES} = f(Q)$. Pour cette raison, nous calculons ces flux par intégration des produits ($Q, [\text{MES}]$) réalisés aux pas de temps décennaux.

RESULTATS ET DISCUSSION

Grâce à la prise en compte des jaugeages solides de la période 1999 à 2003, nous avons complétés les équations de Filizola (2003) reliant les MES moyennes dans les sections à celles de surface (Tableau 2). Nous avons calculés les bilans hydrosédimentaires mensuels sur les tronçons fluviaux du Rio Madeira (FVA-PTV), du Rio Solimões (MAN-TAB) et de l'Amazone (OBI-MAN-PAR-FVA) pour les deux périodes définies au paragraphe précédent. Les Figs 3, 4 et 5 présentent l'évolution saisonnière et le Tableau 3 les valeurs annuelles.

Tableau 2 MES moyennes dans les sections vs MES de surface.

Station	Nombre de jaugeages solides	MES section = f(MES surface)	r
Tabatinga	6	$Y = 0.98 * X + 130$	0.45
Manacapuru	14	$Y = 1.08 * X + 73$	0.61
Porto Velho	3	$Y = 1.50 * X + 9$	0.97
Vista Alegre	6	$Y = 1.72 * X + 38$	0.92
Paricatuba	12	$Y = 1.40 * X$	0.93
Óbidos	18	$Y = 1.70 * X + 25$	0.86

Tableau 3 Bilans annuels des débits, des concentrations en MES, et des flux solides aux stations et inter stations le long des Rios Solimões, Madeira et Amazonas.

	TAB	MAN	MAN-TAB	PTV	FVA	FVA-PTV	PAR	OBI	OBI-(FVA+MAN+PAR)
Période 05/98–04/99									
Débits ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		98 400		17 800	26 000	8200	35 100	163 000	3500
Période 11/98–10/99	51 900	109500	57 600						
MES (mg l^{-1})		179		650	446		9	145	
Période 11/98–10/99	299	169							
FMES (10^6 t an^{-1})		523		546	543	-3	9	761	-314
Période 11/98–10/99	475	531	+56						
Période 03/02–02/03									
Débits ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	52 900	112 500	59 600	16 700	24 400	7700	33 600	177 000	6500
MES (mg l^{-1})	410	187		777	471		8	175	
FMES (10^6 t an^{-1})	676	592	-84	597	479	-118	8	918	-161

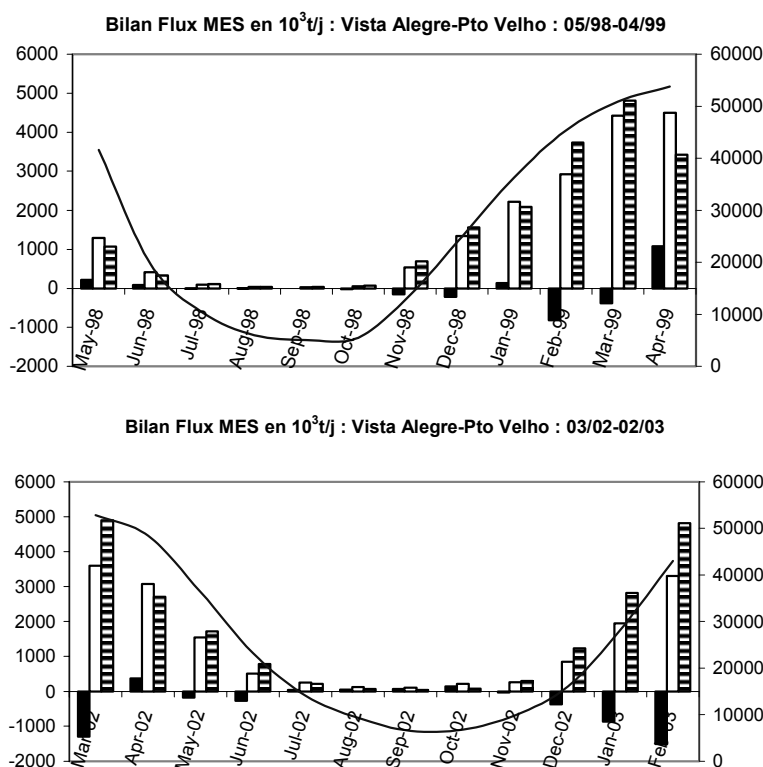


Fig. 3 Hydrogrammes (ordonnée droite en $m^3 s^{-1}$) à Vista Alegre, fluxogrammes des MES (ordonnées gauches en $kg s^{-1}$) aux stations amont (en hachuré) et aval (en blanc) de l'axe du Madeira et fluxogramme différentiel (en noir).

Les concentrations en MES varient entre 10 et $1530 mg l^{-1}$ en fonction des stations et des saisons. Sur chacun des trois tronçons fluviaux étudiés, les Figs 3, 4 et 5 montrent en règle générale, une bonne répétition interannuelle de l'alternance entre des processus d'érosion/transport correspondant aux périodes de décrue et d'étiage et ceux de sédimentation en période de crue.

Pour les deux cycles hydrosédimentaires étudiés:

- sur le tronçon du Rio Madeira entre Porto Velho et Fazenda Vista Alègre, l'on constate une variation interannuelle des processus de transport/sédimentation avec transport durant le premier cycle et sédimentation durant le second. L'on observe une dominance des processus d'érosion/transport durant les étiages et de sédimentation en période de crue. Ces derniers sont bien plus importants en montée de crue qu'en décrue.
- il en est de même pour le tronçon de l'Amazone situé entre les confluences des Rios Negro, Solimões et Madeira et la station d'Óbidos. Mais la particularité réside ici dans le fait que la période de sédimentation s'achève en avril/mai avant le maximum de crue de juin.
- enfin pour le tronçon du Rio Solimões situé entre Tabatinga et Manacapuru, il apparaît également une alternance de ces processus, avec une phase d'érosion/transport dominante en décrue et une phase de sédimentation localisée en montée de crue. Toutefois, ce schéma ne se reproduit pas parfaitement d'un cycle à l'autre. Ainsi de novembre 1998 à février 1999, l'on assiste à une reprise d'érosion

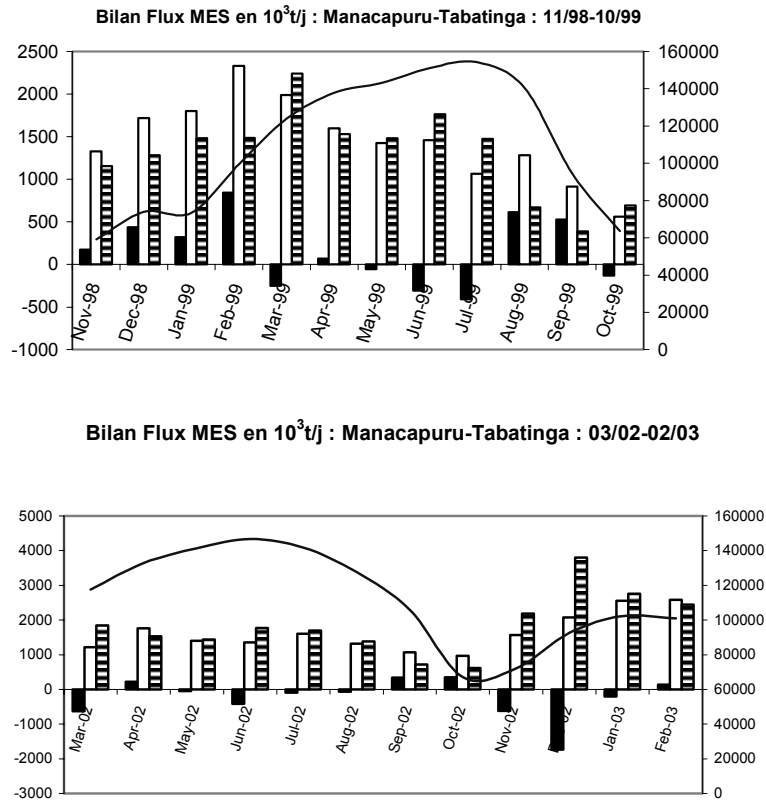


Fig. 4 Hydrogrammes (ordonnée droite en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) à Manacapuru (trait), fluxogrammes des MES (ordonnées gauches en kg s^{-1}) aux stations amont (en hachuré) et aval (en blanc) de l'axe du Solimões et fluxogramme différentiel (en noir).

en tout début de montée de crue alors que le phénomène inverse (sédimentation) se produit à la même époque du second cycle étudié (2002–2003).

Le fait que la régression ($[\text{MES}]_{\text{section}} - [\text{MES}]_{\text{surface}}$) du Tableau 2 concernant la station de Tabatinga ne soit pas de bonne qualité, que la crue de 2003 présente une ascension graduée au lieu de régulière, et que les échantillons de la station de Manacapuru soient légèrement contaminés par ceux du Rio Manacapuru aux eaux noires en rive gauche du Solimões, pourraient expliquer une certaine imprécision dans les bilans inter stations, ainsi que la certaine altération de la reproductibilité interannuelle des processus d'érosion/transport/sédimentation sur ce tronçon fluvial.

Enfin en terme de bilans annuels (Tableau 3), pour ces trois tronçons étudiés, ce sont les processus de sédimentation qui dominent sur ceux d'érosion. Les dépôts le long des Rios Madeira et Amazone varient d'un cycle hydrosédimentaire à l'autre, avec respectivement -3 et $-118.10^6 \text{ t an}^{-1}$ et -314 et $-161.10^6 \text{ t an}^{-1}$. Par contre pour le Rio Solimões, la période 11/98–10/99 a été marquée par une phase d'érosion/transport ($+56.10^6 \text{ t an}^{-1}$), alors que la période 03/02–02/03 l'était par une phase de transport/sédimentation ($-84.10^6 \text{ t an}^{-1}$), ce qui illustre une certaine variabilité interannuelle de ces processus.

Ces processus sédimentaires ont déjà été remarqués et quantifiés par Guyot *et al.* (1996), dans la plaine amazonienne bolivienne aux pentes très faibles ($<3 \text{ cm km}^{-1}$), où les cours d'eau très méandriques divaguent et perdent plus de la moitié de leur charge en

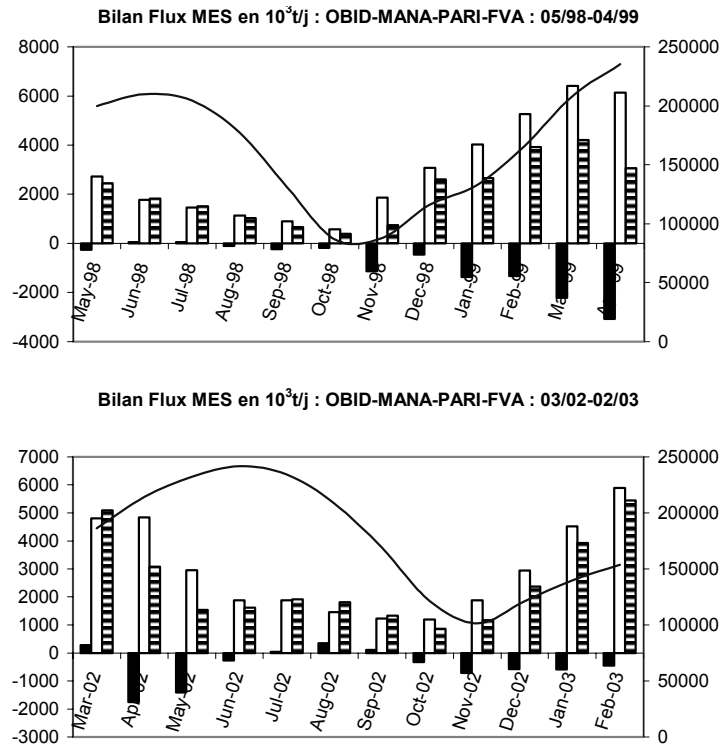


Fig. 5 Hydrogrammes (ordonnée droite en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) à Obidos (trait), fluxogrammes des MES (ordonnées gauches en kg s^{-1}) aux stations amont (en hachuré) et aval (en blanc) de l'axe de l'Amazonie et fluxogramme différentiel (en noir).

suspension. Par contre dans les régions où l'indice de pente est plus élevé, le phénomène inverse s'observe comme le signalent Laraque *et al.* (2004), dans le piedmont amazonien équatorial où les pentes sont de l'ordre de 35 cm km^{-1} . En crue, l'érosion domine sous l'augmentation des niveaux et vitesses de l'eau (phénomène de chasse d'eau) avec la remise en suspension des dépôts fluviaux déposés lors des cycles précédents.

CONCLUSIONS

Ce papier dont les travaux sont basés uniquement sur des données de terrain, permet de quantifier l'évolution mensuelle des processus d'érosion/transport/sédimentation qui se déroulent dans l'amazone brésilienne. A cette fin, les transferts sédimentaires sur les trois principaux axes fluviaux de ce bassin, ont été étudiés durant deux cycles hydrologiques.

En terme de bilans annuels, ce sont les processus de sédimentation qui dominent avec une certaine variabilité interannuelle. Lors d'un cycle hydrologique, une phase d'érosion/transport en décrue alterne avec une phase de sédimentation durant la montée de crue, correspondant à la mise en eau des plaines d'inondation latérales. Pour les deux cycles étudiés, les processus de sédimentation mesurés ont été respectivement de l'ordre de $-3.10^6 \text{ t an}^{-1}$ et $-118.10^6 \text{ t an}^{-1}$ sur le tronçon de 1550 km du Rio Madeira situé entre Porto Velho et Fazenda Vista Alegre, de $-314.10^6 \text{ t an}^{-1}$ et $-161.10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour le tronçon de 650 km de l'Amazonie, situé entre les confluences des Rios Negro, Solimões et Madeira et la station d'Obidos et enfin de $+56.10^6 \text{ t an}^{-1}$

(érosion) et $-84.10^6 \text{ t an}^{-1}$, pour le tronçon de 840 km du Solimões situé entre la station amont de Tabatinga et celle de Manacapuru.

Ces valeurs montrent qu'environ 10% (moyenne des deux cycles étudiés) des flux de MES entrant en Amazonie brésilienne (station de Porto Velho) sédimentent avant l'embouchure du Rio Madeira dans l'Amazone, et que l'Amazone voit cette tendance s'accroître jusqu'à la station de Óbidos avec des dépôts de l'ordre de 20% des flux de MES apportés par les confluences des Rios Negro, Solimões et Madeira. Ces dépôts se répartissent dans les vastes plaines d'inondations latérales (varzêas) périodiquement inondées six mois par an. C'est bien au centre du bassin le long de l'Amazone, qu'ils sont les plus importants par unité de longueur. Des travaux en cours visent à relier ces variations de taux sédimentaires avec celles des indices de pente et des superficies des plaines d'inondation.

Remerciements aux institutions nationales (ANA, CPRM, UnB, IRD) et à leurs agents impliqués dans le chantier HyBAM Brésil.

REFERENCES

- Filizola, N. (2003) Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Thèse de l'UPS de Toulouse, France.
- Guyot, J. L., Filizola, N., Quintanilla, J. & Cortez J. (1996) Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. In: *Erosion and Sediment yield: Global and Regional Perspectives* (ed. by D. E. Walling & B. W. Webb), 55–63. IAHS Publ. 236. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Guyot, J. L. (1993) *Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne*. Orstom Editions, Paris, France.
- Hiez, G., Cochonneau, G., Séchet, P. & Fernandes, U. M. (1991) Aplicação do método do Vetor Regional à análise da pluviometria anual da bacia amazônica, 367–377. In: *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Rio de Janeiro, Anais 1, Brasil.
- Laraque, A., Céron, C., Armijos, E., Pombosa, R., Magat, P. & Guyot, J. L. (2004) Sediment yields and erosion rates in the Napo River Basin: an Ecuadorian Andean Amazon tributary. In: *Sediment Transfer through the Fluvial System* (ed. by V. Golosov, V. Belyaev & D. E. Walling), 220–225. IAHS Publ. 288. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Laraque, A., Guyot, J. L. & Pombosa, R., (2004) Chapitre: Hydroclimatología de la cuenca amazonica del Ecuador y su hidrosedimentología. (Ejemplo de la cuenca del Napo) In: *Geología de la cuenca Oriente* (ed. by P. Baby, M. Rivadeneira, R. Barragan), 131–151. Coedición IRD, IFEA, PETROECUADOR. Quito, Ecuador.
- Molinier, M., Maia, A. C. da S. & Santos, D. F. dos (1991) Balanço hídrico da bacia amazônica. Metodologia e primeiros resultados, 158–167. In: *IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, ABRH, Rio de Janeiro, Anais 1, Brasil.
- Salati, E., Marques, J. & Molion, L. C. B. (1978) Origem e distribuição das chuvas na Amazônia. *Interciência* 3, 200–206.