

Régime et bilan du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos (Pará, Brésil) de 1995 à 2003

JEAN LOUP GUYOT¹, NAZIANO FILIZOLA² & ALAIN LARAQUE³

¹ IRD-LMTG, Casilla 18-1209, Lima 18, Pérou
jloup@amauta.rcp.net.pe

² ANA, SPS, Área 5, Quadra 3, Bloco B e L, 70610-200, Brasília-DF, Brésil

³ IRD-LMTG, US OBHI, BP 64 501, F-34394 Montpellier Cedex 05, France

Résumé La station hydrométrique de Óbidos sur l'Amazone (Pará, Brésil) draine le plus vaste bassin hydrographique continental ($4.8 \times 10^6 \text{ km}^2$), et le débit mesuré à cette station ($172\,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) représente 80% des apports hydriques de l'Amazone à l'Océan Atlantique. Depuis 1995, un échantillonnage décadaire de matières en suspension de surface a été organisé afin de connaître la variabilité temporelle du flux sédimentaire de l'Amazone. La calibration de cet échantillonnage superficiel avec les données de 18 campagnes d'exploration du champ des concentrations dans la section jaugée, nous permet de proposer une série continue du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos, pour la période 1995–2003. Les résultats obtenus montre une forte variabilité saisonnière des flux, non connectée au débit, pour un apport moyen estimé à $810 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$.

Mots clefs Amazone; Brésil; flux sédimentaire; hydrologie

The suspended sediment flux of the River Amazon at Obidos, Brazil, 1995–2003

Abstract The hydrometric station on the River Amazon at Obidos gauges the world's largest river basin ($4.8 \times 10^6 \text{ km}^2$), and the mean flow measured at this station ($172\,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) represents 80% of the water flux of the Amazon to the Atlantic Ocean. Since 1995, a regular 10-day programme of surface sampling of suspended sediment has been in operation, with the aim of documenting the temporal variability of the sediment flux of the Amazon. Calibration of the surface samples with the results of detailed sampling of sediment concentrations in the cross section provided by 18 sampling campaigns, has made it possible to generate a continuous record of sediment transport for the River Amazon at Obidos for the period 1995–2003. These data have highlighted the marked seasonality in the sediment flux, unconnected to the variation of discharge, and provide an estimate of the mean annual suspended sediment flux of $810 \cdot 10^6 \text{ t year}^{-1}$.

Key words Amazon River; Brazil; hydrology; sediment flux

INTRODUCTION

Avec une superficie de $6.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ (Goulding *et al.*, 2003), le bassin de l'Amazone est le plus grand bassin hydrographique terrestre. A Óbidos, petite ville de 40 000 habitants située 800 km en amont de l'embouchure, l'Agence Nationale de l'Eau du Brésil (ANA, ex-DNAEE) a installé une station hydrométrique qui est en fonctionnement depuis 1968. Les études menées par les hydrologues de l'ANA et de l'IRD au sein du programme de recherche HyBAM, Hydrologie du Bassin Amazonien (IRD-

CNPq), ont permis, grâce à l'acquisition d'un courantomètre à effet Doppler dès 1994 (Guyot *et al.*, 1998), d'établir une nouvelle courbe d'étalonnage de la station (Callède *et al.*, 2001) et de proposer une série historique fiable de débits journaliers (Callède *et al.*, 2002, 2004).

La première estimation réaliste du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos est due à Gibbs (1967) qui propose une valeur de $500 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, basée sur les résultats de deux campagnes, en hautes et basses eaux. A partir de deux nouvelles campagnes réalisées en hautes eaux (1976 et 1977), Meade *et al.* (1979) évaluent ce flux sédimentaire à $900 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$. En utilisant les nombreux résultats du projet CAMREX, basés sur une exploration de la section jaugée par un échantillonnage par intégration, Meade *et al.* (1985) proposent une nouvelle valeur du flux sédimentaire à $1200 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$. En utilisant les données du réseau hydrométrique brésilien de l'ANEEL (ex-DNAEE), basées sur un échantillonnage trimestriel par intégration, Bordas *et al.* (1988), puis Filizola *et al.* (1999) proposent une valeur de $600 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$ pour la station de Óbidos, finalement assez proche de la première estimation de Gibbs.

Afin de mieux appréhender le régime du transport sédimentaire dans le bassin de l'Amazone, une double approche a été adoptée par le programme HyBAM:

- (a) la mise en place d'un réseau de station de référence sur les principaux fleuves du bassin (Fig. 1), basée sur un échantillonnage décadaire de surface (Guyot *et al.*, 1999);
- (b) l'exploration de la distribution des concentrations dans la section jaugée lors de campagnes à différentes époques du cycle hydrologique (Filizola, 2003).

Le présent article ne traitera que de la station de Óbidos.

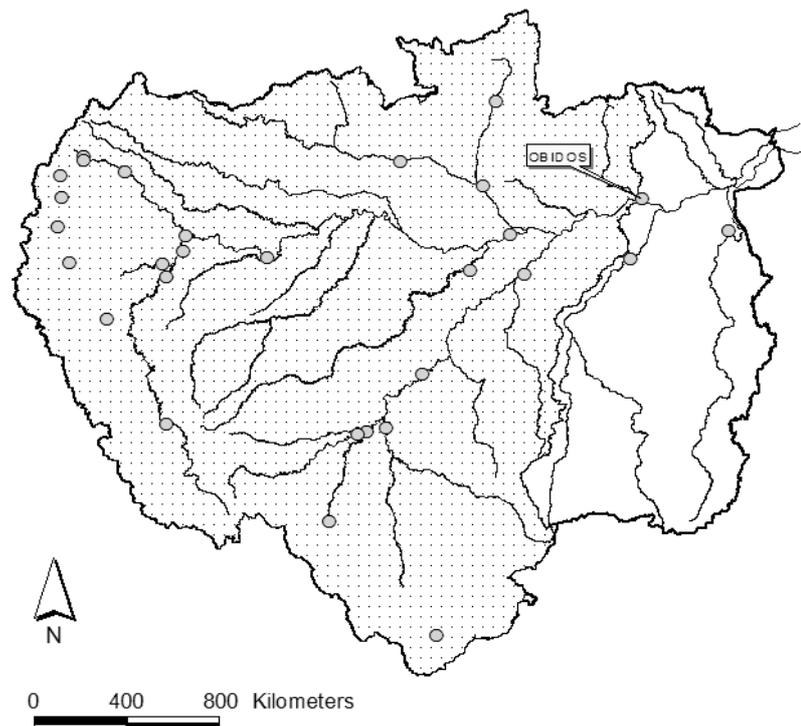


Fig. 1 Carte des stations de référence HyBAM (○) dans le bassin de l'Amazone. Localisation de la station de Óbidos.

DONNEES ET METHODES

Les données hydrologiques de la station de Óbidos ($4.8 \cdot 10^6 \text{ km}^2$) proviennent de la série historique de cotes journalières (1968–2003) de l'ANA. Les débits journaliers ont été calculés à partir de la courbe de tarage établie par le projet HyBAm (Callède *et al.*, 2001, 2002). De 1995 à 2003, le module de l'Amazonie à Óbidos est de $172\,000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, et cette période se caractérise par un déficit hydrique sensible (-15%) au cours de l'année hydrologique 1997–1998 marquée par un fort "El Niño" (Fig. 2). De même, le plus fort débit annuel sera observé en 1999, année marquée par un phénomène de type "La Niña".

De mars 1995 à décembre 2003, 290 échantillons d'eau (environ 500 ml) ont été prélevés par un observateur, près de la surface (0.2 m de profondeur), et au milieu du fleuve. Les échantillons sont ensuite envoyés au laboratoire de l'ANA à Brasília, où les matières en suspension (MES) sont déterminées par filtration frontale, sur filtres en acétate de cellulose de $0.45 \mu\text{m}$ de porosité. Les résultats obtenus (Fig. 3) montrent une forte variabilité des MES de surface allant de 9 à 260 mg l^{-1} au cours du cycle hydrologique, mais qui n'est pas corrélée de manière simple avec les débits (Guyot *et al.*, 1999). La valeur journalière de MES de surface a été déterminée sous HYDRACCESS® (Vauchel, 2004) par interpolation des observations décennales de MES en fonction de l'évolution du débit.

Afin de calibrer l'information fournies par les échantillons de surface, 18 campagnes d'exploration complète de la section de jaugeage ont été réalisées à Óbidos de 1995 à 2003, à des époques hydrologiques différentes (Fig. 2). Durant ces campagnes, les mesures de débit ont été réalisées par courantométrie à effet Doppler (ADCP), et le prélèvement d'échantillons de grand volume (10 litres) s'est effectué sur une quinzaine de points répartis sur trois verticales (Filizola, 2003). En mars 1995, une expérience a été réalisée à Óbidos afin de comparer les différentes techniques d'échantillonnage: celles par intégration utilisées par l'ANA et l'USGS, et l'échantillonneur ponctuel utilisé par HyBAm. Les résultats obtenus se sont avérés très proches, avec un écart de 5% entre la méthode HyBAm et celle de l'USGS (Filizola & Guyot, 2004).

Après échantillonnage, une première séparation du matériel particulaire grossier est réalisée sur un tamis de $62 \mu\text{m}$, avant la filtration frontale classique sur filtres de $0.45 \mu\text{m}$.

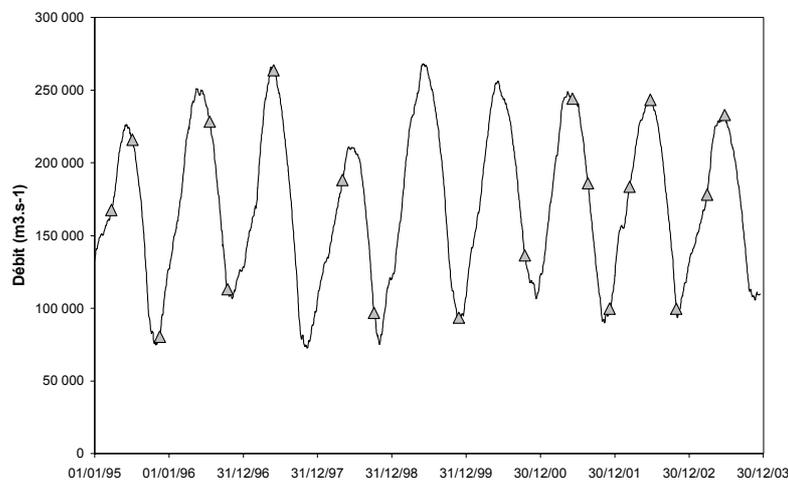


Fig. 2 Débits journaliers de l'Amazonie à Óbidos, de 1995 à 2003. Localisation temporelle (Δ) des 18 campagnes d'exploration de la section jaugeée.

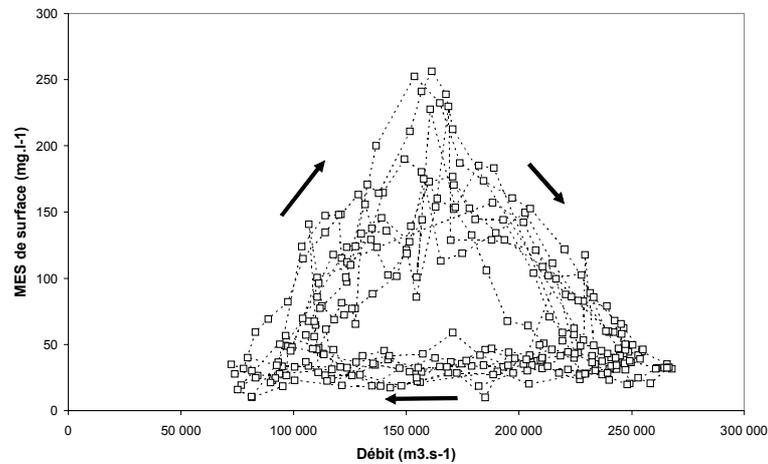


Fig. 3 MES de surface vs débit moyen journalier au cours du cycle hydrologique (de mars 1995 à décembre 2003).

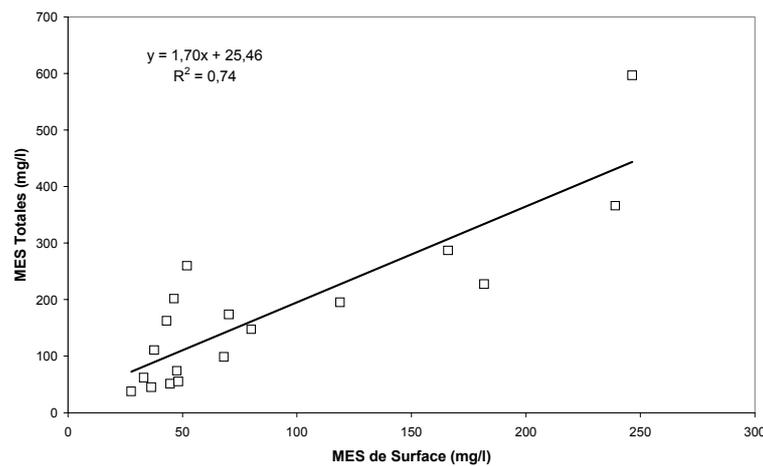


Fig. 4 MES totales dans la section vs MES de surface.

Pour l'ensemble des 18 campagnes menées sur l'Amazone à Óbidos, 320 échantillons ont été prélevés à différentes profondeurs. Avec une moyenne des MES de surface de 73 mg l^{-1} , et des MES totales dans la section de 150 mg l^{-1} , le rapport moyen MES(surface) sur MES(totales) à Óbidos est de 0.5. La relation liant les MES de surface aux MES totales dans la section (Fig. 4) sera utilisée par HYDRACCESS® pour le calcul des MES totales journalières.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les données des échantillons de surface ont permis de vérifier la forte variabilité temporelle du flux sédimentaire de l'Amazone à Óbidos, avec un pic de MES marqué en février–mars, alors que le maximum hydrologique (mai–juin) est caractérisé par des concentrations en MES plutôt faibles (Guyot *et al.*, 1999). Ce phénomène de décalage de 3 à 4 mois entre maximum sédimentaire et le maximum hydrologique peut s'expliquer

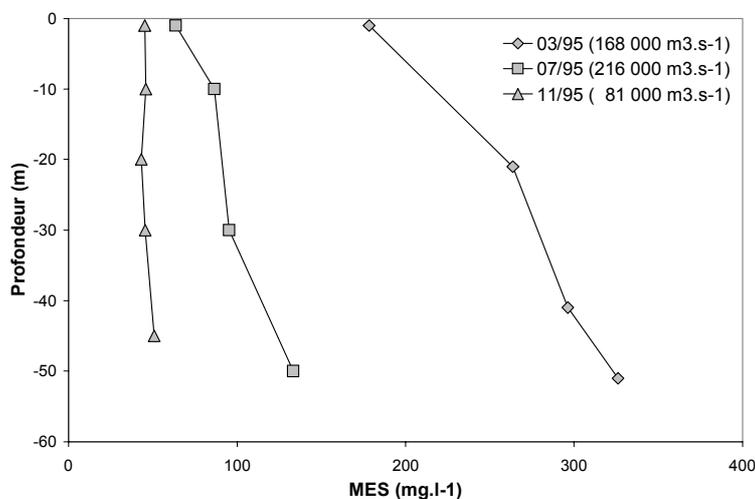


Fig. 5 Profil des MES dans la section en fonction de la profondeur en montée de crue (mars 1995), en hautes eaux (juillet 1995) et en basses eaux (novembre 1998).

par le décalage temporel des apports des différents tributaires de l'Amazonie. La crue de l'Amazonie à Óbidos débute avec l'arrivée des eaux du Rio Madeira, issues de la partie Sud du bassin (Andes de Bolivie et du Pérou), et présentant de fortes teneurs en MES. Ensuite, les eaux du Rio Solimões provenant de la partie occidentale du bassin (Andes du Pérou et d'Equateur, plaine d'Amazonie centrale), se superposent à celles du Rio Madeira. Enfin, les eaux du Rio Negro issus du bouclier guyanais au Nord du bassin, à très faible teneur en MES, arrivent lors de la décrue de l'Amazonie. La résultante de ces apports très distincts sera la non univocité de la relation liant les MES et le débit (Fig. 3), ce qui invalide toute possibilité de calcul simple du flux sédimentaire à partir du seul débit.

Par ailleurs, le flux sédimentaire ne semble pas être affecté par le fort épisode "El Niño" de 1997–1998, ni par l'épisode suivant "La Niña" de 1999, alors qu'une augmentation sensible des MES est notée à partir de 2000.

L'exploration des sections réalisée aux cours de 18 campagnes à Óbidos a montré (Fig. 5) que les MES augmentent avec la profondeur en période de montée de crue (mars 1995), notamment du fait de la part relativement importante du matériel grossier ($>62 \mu\text{m}$). En période de basses eaux (novembre 1995), le profil vertical des MES est plutôt rectiligne, et les MES observées sont essentiellement du matériel fin (Filizola, 2003). Lors du maximum hydrologique (mai 1995), le profil des MES est très voisin de celui des basses eaux, avec des teneurs relativement peu élevées et une légère augmentation des concentrations avec la profondeur. Pour l'ensemble des campagnes, la relation liant les MES totales de la section aux MES de surface (Fig. 4) montre que la concentration moyenne de la section est sensiblement égale au double de la valeur de MES de surface.

Les valeurs journalières des concentrations en MES de la section varient de 40 à 460 mg l^{-1} au cours de la période d'observation, pour une valeur moyenne de 150 mg l^{-1} . Le flux de matières en suspension journalier obtenu présente une variabilité saisonnière beaucoup plus marquée que celle des débits (Fig. 6). Pour la période 1995–2003, le débit moyen est de 172 000 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, et les valeurs extrêmes enregistrées sont de 268 200 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (2 juin 1999) et de 72 400 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ (9 novembre 1997). Pour la même période, le flux

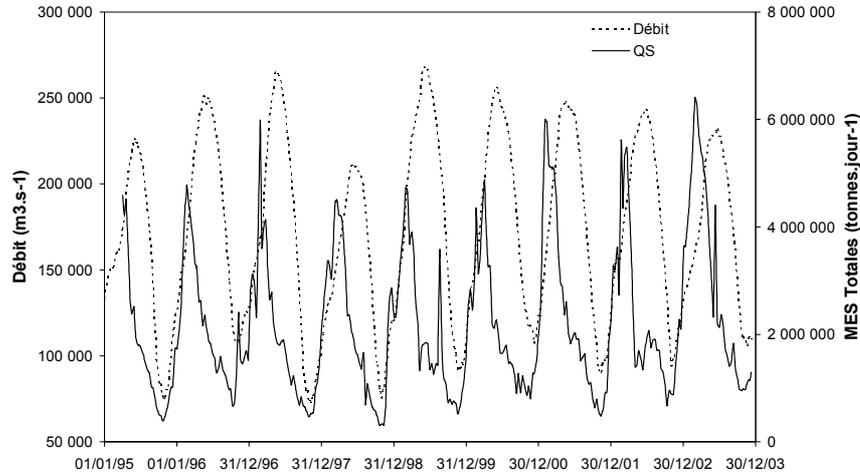


Fig. 6 Débit et flux sédimentaire journaliers, de 1995 à 2003.

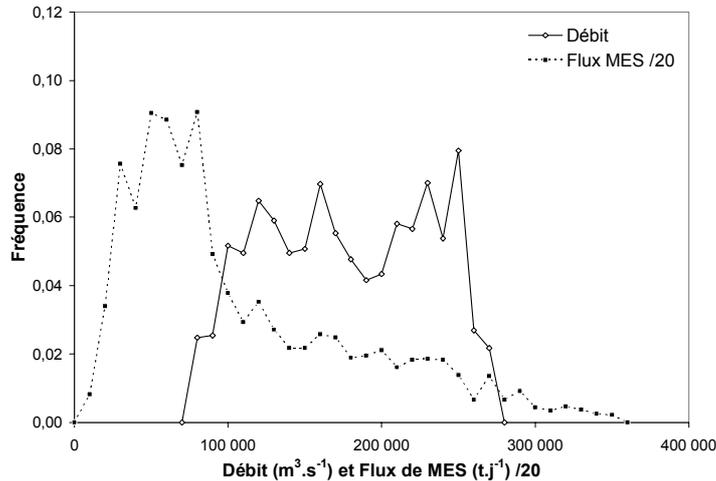


Fig. 7 Distribution de fréquence du débit et du flux de MES journaliers.

moyen de matières en suspension est évalué à $2.2 \cdot 10^6 \text{ t jour}^{-1}$, avec des extrêmes de $6.4 \cdot 10^6 \text{ t jour}^{-1}$ (1 mars 2003) et de $0.3 \cdot 10^6 \text{ t jour}^{-1}$ (20 octobre 1998). Avec un rapport des valeurs extrêmes de 22, le flux sédimentaire de l'Amazone, malgré la taille du bassin et les débits mesurés, apparaît être très variable au cours du cycle hydrologique. Alors que la distribution de fréquence des débits journaliers présente une courbe assez normale (Fig. 7), celle du flux de MES journalier montre une forte dissymétrie à gauche, traduisant des pics de flux sédimentaire de courte durée.

A Óbidos, l'Amazone exporte vers l'Océan Atlantique un flux de MES estimé aujourd'hui à $803 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, alors que le transport de fond, notamment par les dunes, est quant à lui estimé à $4.7 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, soit moins de 1% du flux sédimentaire total (Strasser *et al.*, 2004). Le flux sédimentaire total de l'Amazone à Óbidos est donc de l'ordre de $810 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, valeur proche des premières estimations de Meade *et al.* (1979), ainsi que de celles issues des données du réseau de l'ex-DNAEE (Bordas *et al.*, 1988; Filizola, 1999). La différence significative entre notre estimation et celle de Meade *et al.* (1985) qui propose un flux de $1200 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, ne semble pas provenir des méthodes d'échantillonnage (Filizola & Guyot, 2004). L'explication de cette différence serait plus à

rechercher dans la prise en compte, ou non, de la forte variabilité temporelle des teneurs, ainsi que dans le mode de calcul du flux de MES (non univocité de la relation liant les MES au débit).

CONCLUSION

Les résultats acquis par le programme HyBAM depuis 1995 ont permis d'appréhender la variabilité temporelle du flux de matières en suspension de l'Amazonie à Óbidos, grâce à la mise en place d'un protocole d'échantillonnage décennal. Cette variabilité apparaît être beaucoup plus forte que celle des débits. Les phénomènes de type "El Niño" de 1997–1998 et "La Niña" de 1999 ne semblent pas avoir d'impact sur le flux sédimentaire, alors qu'une augmentation sensible est observée à partir de 2000. Les données obtenues lors de 18 campagnes de mesures de 1995 à 2003, ont permis de connaître la distribution des MES dans la section jaugée, et de construire une relation MES totales = f(MES de surface). L'intégration de ces informations sur la variabilité temporelle d'une part, et sur la distribution dans la section d'autre part, a permis de construire une série historique fiable de MES journalières, de 1995 à 2003. À partir de ces données, le flux sédimentaire de l'Amazonie à Óbidos est de l'ordre de $810 \cdot 10^6 \text{ t an}^{-1}$, pour un débit moyen de $172 \cdot 000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La poursuite de ce type d'observations sur l'ensemble des stations de référence du réseau HyBAM permettra de mieux connaître le fonctionnement hydrologique du bassin de l'Amazonie.

Remerciements Nous tenons à remercier tout d'abord l'observateur de la station de référence de Óbidos, sans lequel ce travail n'aurait pas eu lieu. Enfin, les résultats présentés sont le fruit d'une œuvre collective, et nous sommes reconnaissant aux membres d'équipage des différentes embarcations utilisées, ainsi qu'à tous les participants des nombreuses campagnes réalisées à Óbidos par l'équipe HyBAM, qu'ils soient étudiants, ingénieurs ou chercheurs de l'ANA, de l'ANEEL, de la CPRM, de l'IRD, de l'UnB, ou encore de l'UFRJ.

REFERENCES

- Bordas, M. P., Lanna, A. E. & Semmelmann, F. R. (1988) Evaluation des risques d'érosion et de sédimentation au Brésil à partir de bilans sédimentologiques rudimentaires. In: *Sediment Budgets* (ed. by M. P. Bordas & D. E. Walling) (Porto Alegre Symposium, December 1988), 359–368. IAHS Publ. 174. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Callède, J., Kosuth, P. & Oliveira, E. (2001) Etablissement de la relation hauteur-débit de l'Amazonie à Óbidos: méthode de la dénivelée normale à géométrie variable. *Hydrol. Sci. J.* **46**(3), 451–463.
- Callède, J., Guyot, J. L., Ronchail, J., Molinier, M. & Oliveira, E. (2002) L'Amazonie à Óbidos (Brésil). Etude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrol. Sci. J.* **47**(2), 321–333.
- Callède, J., Guyot, J. L., Ronchail, J., L'Hôte, Y., Niel, H. & Oliveira, E. (2004) Evolution du débit de l'Amazonie à Óbidos de 1902 à 1999. *Hydrol. Sci. J.* **49**(1), 85–97.
- Filizola, N. (2003) Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amazoniens. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Filizola, N. & Guyot J. L. (2004) The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determinations in the River Amazon. *Hydrol. Sci. J.* **49**(1), 143–153.
- Filizola, N., Guyot, J. L. & Boaventura, G. (1999) Fluxo de sedimentos em suspensão na Amazônia - uma análise a partir da base de dados da ANEEL. In: *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins* (Manaus'99 Symposium, Manaus, November 1999). HyBAM Publ., CD-Rom, Brasília, Brazil.

- Gibbs, R. J. (1967) The Geochemistry of the Amazon River System. Part 1. The factors that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids. *Geol. Soc. Am. Bull.* **78**, 1203–1232.
- Goulding, M., Barthem, R. & Ferreira, E. (2003) *The Smithsonian Atlas of the Amazon*. Smithsonian Books, Washington and London, USA and UK.
- Guyot, J. L., Filizola, N. & Guimarães, V. (1998) Amazon suspended sediment yield measurements using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP): first results. In: *Hydrology in the Humid Tropic Environment* (ed. by A. I. Johnson & C. A. Fernández-Jáuregui) (Proc. Kingston Symp., November 1996), 109–115. IAHS Publ. 253. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Guyot, J. L., Filizola, N., Laraque, A. & Seyler, P. (1999) La variabilité saisonnière des flux sédimentaires dans le bassin de l'Amazone. In: *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins* (Proc. Manaus'99 Symp., November 1999). HyBAm Publ., CD-Rom, Brasília, Brazil.
- 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.
- Strasser, M. A., Vinzon, S. B. & Borba Mascarenhas, F. C. (2004) Transporte de sedimentos de arrastre no Rio Amazonas. In: *Surface Hydrology and Water Chemistry* (III LBA Scientific Conference, Brasília, July 2004). Poster.
- Vauchel, P. (2004) HYDRACCESS, gestion et traitement de données hydrologiques sous Office 2000. Publ. HyBAm, La Paz, Bolivie.