

La variabilité des débits de l'Amazone à Obidos (Amazonas, Brésil)

JACQUES CALLEDE, JEAN LOUP GUYOT & MICHEL MOLINIER

ORSTOM, CP 09747, CEP 70001-970 Brasília, Distrito Federal, Brésil

VALDEMAR SANTOS GUIMARÃES, EURIDES DE OLIVEIRA & NAZIANO PANTOJA FILIZOLA

DNAEE, SGAN 603, CEP 70830-030, Brasília, Distrito Federal, Brésil

Résumé La station hydrométrique d'Obidos est la station la plus aval pour le contrôle des débits de l'Amazone. Les hauteurs d'eau ont été observées à cette station de 1928 à 1948 et de 1968 jusqu'à aujourd'hui. Contrairement à ce qui a été admis pour la Décennie Hydrologique, ces deux séries n'ont pas leurs zéros calés au même niveau. Une analyse critique des jaugeages effectués à cette station depuis 1963 a permis de définir une relation hauteur-débit univoque. Le module annuel de l'Amazone à Obidos est de $169\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, l'étiage le plus faible observé est de $75\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1995) et la crue maximum (1953) est estimée à $380\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. L'Amazone, avec ses $36\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$, est le plus puissant fleuve du Monde, et c'est aussi l'un des plus réguliers.

INTRODUCTION

L'Amazone est incontestablement le fleuve géant de la planète avec un bassin versant de plus de $6 \times 10^6\text{ km}^2$, mais la connaissance des débits de ce fleuve est relativement récente. Les premières études du régime de l'Amazone sont dues à Le Cointe (1935) et Pardé (1936, 1954), alors que les premières mesures sérieuses de débit commencent en 1963 sous l'impulsion de l'USGS (Oltman *et al.*, 1964).

La station hydrométrique de mesure des débits du fleuve la plus en aval est celle d'Obidos ($01^{\circ}56'S$, $055^{\circ}30'O$). C'est la station de référence des débits de l'Amazone, qui draine un bassin de $4\,680\,000\text{ km}^2$ (Fig. 1). Au cours du temps, diverses courbes de tarage ont été proposées pour cette station (Oltman, 1968; DNAEE, SGTE-LASA-DNPVN, PHCA, EGASAT in Jacon, 1987). Ces courbes de tarage, largement imprécises du fait de la grande dispersion des points, ne concernent que la station actuelle (en service depuis 1968). Une de ces courbes de tarage a été utilisée pour le calcul des débits de la période 1927-1948, alors qu'il existe un décalage important des deux séries d'échelles. Ces valeurs erronées ont été publiées par l'UNESCO (1971), et ont ainsi été reprises par la communauté scientifique pour un certain nombre d'études sur l'hydrologie de l'Amazone (Rodier & Roche, 1984; Tardy & Probst, 1992; Matsuyama *et al.*, 1993; Tardy *et al.*, 1994).

L'objectif de cette étude est de recalibrer les différentes échelles sur une même base, de proposer une nouvelle courbe de tarage de la station d'Obidos permettant le calcul de débits plus réalistes, et de déterminer les caractéristiques de l'écoulement à cette station de référence de l'Amazone.



Fig. 1 Localisation de la station d'Obidos dans le bassin amazonien.

LA STATION HYDROMETRIQUE DE OBIDOS

Historique des échelles limnimétriques

La première échelle, appelée "ancienne échelle" a été installée par la Direction d'Hydrographie et de Navigation (DHN) sur l'embarcadère du port d'Obidos, et a fonctionné de 1927 à 1948. La crue de 1953 a emporté cet embarcadère et il n'existe malheureusement aucun rattachement altimétrique de l'échelle. A l'occasion des trois jaugeages effectués en 1963 et 1964, Oltman a essayé de reconstituer le zéro de l'ancienne échelle à l'aide d'une photographie sur laquelle figuraient l'échelle et le Marché municipal. Il a estimé que la crue exceptionnelle de 1953 a atteint la cote de 7.5 m. L'erreur à craindre est estimée, selon lui, à ± 10 cm (Oltman *et al.*, 1964). Lors de la mesure de débit de mai 1967, une échelle provisoire, de 6.00 m à 7.50 m, a été installée sans qu'il y soit fait de lecture systématique des hauteurs d'eau. Un rattachement altimétrique est alors effectué sur trois repères, dont seul subsiste celui du Marché municipal, en s'efforçant de se caler au même niveau que celui de Oltman, donc de l'ancienne échelle (Pacheco da Veiga, 1968). Un récent nivellement (1995) indique que le zéro de cette échelle serait 8 cm plus haut. L'échelle actuelle a été installée sur le nouvel embarcadère, le 22 février 1968. Un rattachement altimétrique a été effectué sur au moins trois repères. Un limnigraphe a été installé début 1982, plusieurs kilomètres en amont. Ce limnigraphe est équipé, depuis 1985, d'une télétransmission via le satellite ARGOS. Enfin en 1969, une batterie d'échelles limnimétrique a été implantée au droit de la section permanente de jaugeage, en rive droite, deux kilomètres en aval du Port (Fig. 2).

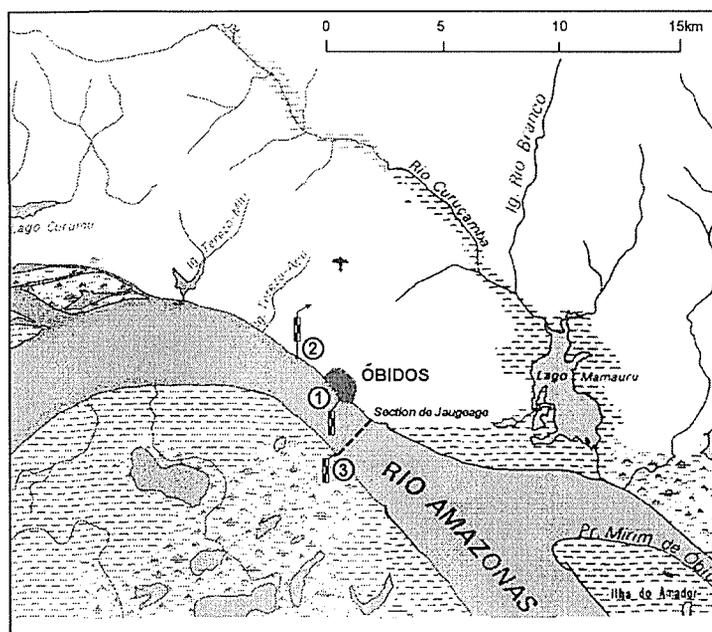


Fig. 2 Les échelles limnimétriques d'Obidos (1 = station du port, 2 = limnigraph et télétransmission ARGOS, 3 = station de la section de jaugeage).

Décalage entre les échelles anciennes et actuelles

Tout aurait laissé à penser, dans la littérature relative à Obidos, que le zéro de l'échelle actuelle eut été calé à la même altitude que celui de l'ancienne échelle. Hélas il n'en est rien. La meilleure preuve est que la crue de l'Amazone de 1953, la plus forte observée sur son bassin depuis au moins 1928, est à la cote 7.5 m sur l'ancienne échelle. Sur les niveaux observés de l'échelle actuelle, cette valeur a été dépassée cinq fois de 1970 à 1996.

Trois approches ont été utilisées pour définir la valeur du décalage:

- Calage du délaissé de la crue de 1953 par rapport à l'échelle actuelle. Un nivellement réalisé en 1995, à partir de clichés photographiques de la crue de 1953, donne une hauteur de 8.22 m sur l'échelle actuelle, soit un décalage de 72 cm entre les échelles anciennes et actuelles.
- Comparaison des données des jaugeages de Oltman avec la courbe de tarage. L'écart moyen obtenu est de 78 cm.
- Différence entre les valeurs moyennes des hauteurs d'eau observées sur les deux échelles. Les données de précipitation annuelle de 32 stations réparties sur le bassin amazonien, pour la période 1925-1992, montrent qu'il n'y a pas de variation significative, à l'échelle du bassin, de la pluviométrie entre les deux périodes 1927-1948 et 1968-1990. La comparaison des hauteurs d'eau moyennes des deux séries est donc valide. L'échelle ancienne (18 ans d'observations) donne une moyenne inter-annuelle de 3.96 m. L'échelle actuelle (25 ans d'observations) donne 4.79 m. Le décalage serait de 83 cm. Mais il est préférable de travailler en débits et non en

hauteurs d'eau car, bien évidemment, la relation hauteur-débit est loin d'être linéaire. Une approche, avec des décalages successifs différents, donne une valeur égale des débits moyens interannuels ($169\,700\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ sur la période 1968-1995) lorsque le décalage est de 82 cm.

Une valeur moyenne de décalage a été utilisée pour le calcul des débits de la période 1927-1948. Une erreur de 1 cm sur le décalage entraîne une erreur de 0.22% sur la valeur du module annuel, une erreur de 0.18% sur les étiages (hauteur d'eau de l'ordre de 1 m), une erreur de 0.38% sur les hautes eaux (hauteur d'eau de l'ordre de 7 m), une erreur de 0.47% sur les très hautes eaux (hauteur d'eau de l'ordre de 8 m). Pour quelques centimètres, l'erreur est inférieure à la précision d'un bon jaugeage. Par contre traiter les débits de l'ancienne échelle comme si elle était avec le même zéro que l'échelle actuelle entraîne une erreur de 16.9%, ce qui est considérable.

LA MESURE DES DEBITS A OBIDOS

Les débits mesurés sur l'Amazone à Obidos sont les plus forts débits du Monde. La faible pente du fleuve (de 1-2 cm km⁻¹ in Sioli, 1984) fait que la marée de l'océan Atlantique remonte très en amont. A Obidos, les enregistrements du limnigraphe indiquent une oscillation journalière due à la marée, en basses et moyennes eaux. Huit mesures de débit, réalisées lors du très sévère étiage de 1995 semblent indiquer que cette influence soit négligeable sur les débits.

La section de mesure, primitivement au droit d'Obidos, a été transférée 2 km en aval (Fig. 2). A cet emplacement, la rive droite est légèrement plus haute que la plaine d'inondation en face d'Obidos. Pendant quelques kilomètres, l'Amazone coule dans un chenal sans aucun débordement possible excepté en hautes eaux exceptionnelles. La largeur n'est plus que de 2300 m, alors qu'en aval et en amont elle peut atteindre 10 km et plus. La profondeur est supérieure à 50 m. La vitesse de l'eau dépasse 2 m s⁻¹, tant en surface qu'au fond.

Les jaugeages

De 1963 à Juillet 1996, 122 mesures de débit ont été effectuées par différents groupes d'hydrologues utilisant des techniques différentes. Les principaux intervenants ont été:

- (a) les hydrologues de l'USGS, qui ont réalisé, de 1963 à 1969, six jaugeages par la méthode "des grands fleuves" (Oltman, 1968). La mesure de la vitesse de l'eau s'effectue au moulinet hydrométrique, avec de deux à six points par verticale, et au moins 10 verticales dans la section. Le bateau n'est pas ancré et la détermination de la position s'effectue soit avec un sextant (ou un cercle hydrographique) depuis le bateau, soit avec deux théodolites depuis la rive.
- (b) Les hydrologues du Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica (DNAEE) qui ont utilisé, tour à tour depuis 1971, la méthode des "grands fleuves" (11 mesures) et celle du "bateau mobile" (88 mesures), qui est une mesure par intégration horizontale de la vitesse de surface (Smoot *et al.*, 1967). Le bateau se déplace d'une rive à l'autre, avec un moulinet hydrométrique mesurant en continu la vitesse de l'eau à 1 m de profondeur. La mesure de l'angle pris par le moulinet

- hydrométrique par rapport à l'axe de la section de jaugeage est utilisée pour calculer les composantes de la vitesse de déplacement du bateau le long de la section, d'une part, et de la vitesse de l'eau, d'autre part. Connaissant la vitesse moyenne de surface, le débit écoulé sera facilement calculé si l'on connaît la section mouillée (déterminée généralement par un relevé à l'écho-sondeur), et le rapport existant entre la vitesse moyenne dans la section mouillée et la vitesse moyenne de surface.
- (c) Ceux du Projet CAMREX (Univ. de Washington, CENA, INPA) avec 12 mesures effectuées suivant leur propre méthodologie, de 1982 à 1991 (Meade, 1985; Richey *et al.*, 1985). Cette méthode est voisine de celle des "grands fleuves", mais la mesure des vitesses s'effectue par intégration verticale du champ des vitesses, tant à la descente qu'à la remontée du moulinet.
 - (d) Depuis 1995, l'acquisition d'un courantomètre à effet Doppler a permis aux hydrologues du programme HiBAm (DNAEE/ORSTOM) de réaliser cinq nouveaux jaugeages précis à Obidos (Guyot *et al.*, 1995). Ce matériel récent, qui utilise l'effet Doppler pour la mesure de la vitesse de l'eau, est le fruit du développement de matériels océanographiques (RDI, 1989). Il est parfaitement adapté à l'hydrométrie des grands fleuves (Simpson & Oltmann, 1993).

Relation hauteur-débit

La totalité des jaugeages se distribuent d'une manière extrêmement "nuageuse" qui rend impossible tout tracé de la courbe de tarage avec un minimum de précision (Fig. 3). L'élimination de la totalité des jaugeages effectués suivant la méthode du "bateau mobile" réduit fortement la distribution et permet un ajustement acceptable (Fig. 4). La dispersion, entre une courbe de tarage considérée comme univoque, et les points de jaugeage est de 4.6%.

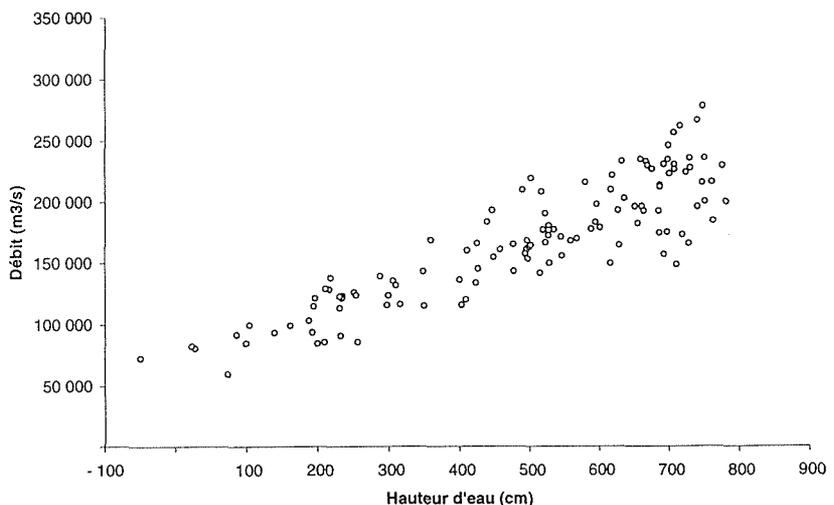


Fig. 3 Relation hauteur-débit avec l'ensemble des 122 jaugeages de l'Amazone à Obidos.

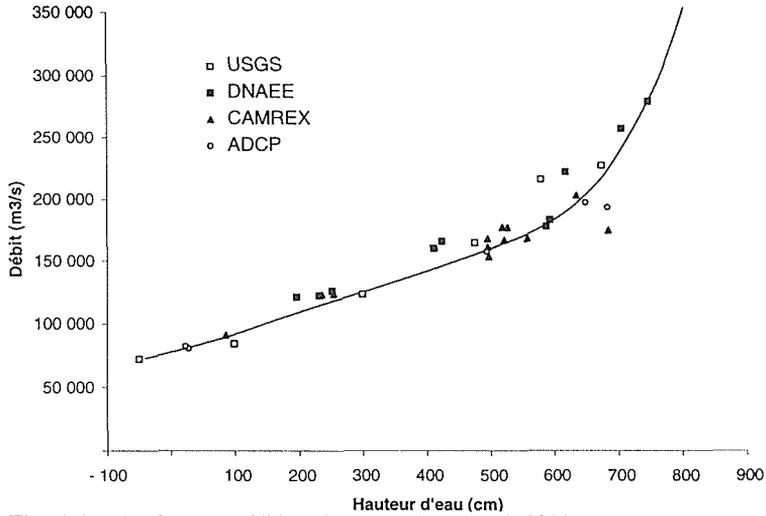


Fig. 4 Courbe de tarage débit vs hauteur, Amazone à Obidos.

Débordements en période de crue

Des débordements dans le lit majeur ont lieu quand la cote à la station limnimétrique est supérieure à 7.6 m (Oltman, 1968). Un survol aérien d'Obidos lors du jaugeage record du monde (21 juin 1994, $279\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$) a confirmé l'absence de débordements pour la cote 7.49 m (Guimarães *et al.*, 1994). En prenant pour base de calcul un lit majeur de 30 km de large, et une vitesse de l'eau de l'ordre de 0.3 m s^{-1} , le débit dans le lit majeur, pour une cote à Obidos de 8.30 m serait de $26\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Pour cette cote, l'extrapolation logarithmique du lit mineur donne un débit de $378\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ et le débit total atteint $384\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. Les débordements ne représenteraient alors que 1.5% environ du débit total, ce qui est peu.

ETUDE STATISTIQUE DES DEBITES DE L'AMAZONE A OBIDOS

La traduction des hauteurs en débits a été réalisée en tenant compte d'un décalage de 77 cm pour la première série de données (1927-1948).

Débits moyens intermensuels

Ces débits ont été calculés sur un échantillon variant de 46 à 48 années d'observation. L'année hydrologique commence au 1 novembre et se termine, bien sûr, le 31 octobre de l'année suivante. Le régime est tout à fait régulier: une seule crue et un seul étiage. La symétrie entre montée des eaux et décrue est quasi parfaite (Fig. 5). Cette régularité va se retrouver dans toutes les autres caractéristiques du régime: modules, étiages et crues, ce qui fait que toutes les lois statistiques s'appliquent à l'Amazone.

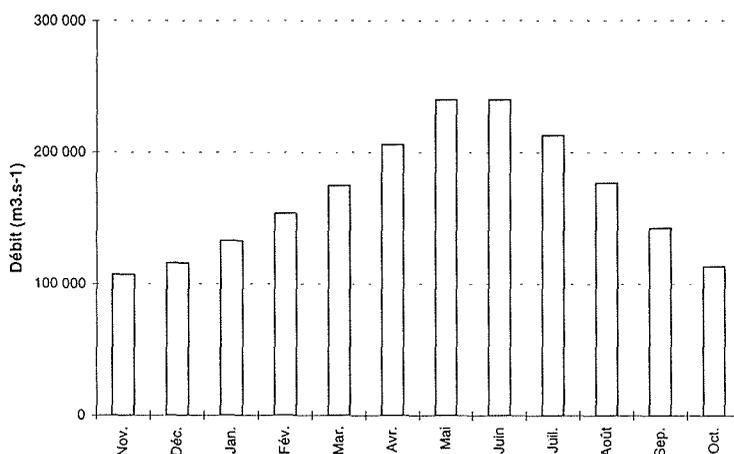


Fig. 5 Débits moyens mensuels de l'Amazone à Obidos (1927-1995).

Modules

Quarante-trois modules ont été calculés puis analysés. Le module le plus fort est de $206\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1989), le plus faible est de $131\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1992), pour un module moyen de $169\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ($36.1\text{ l s}^{-1}\text{ km}^{-2}$, $1140\text{ mm année}^{-1}$). Le coefficient K3 (rapport du module de l'année décennale humide sur celui de l'année décennale sèche) qui caractérise l'irrégularité interannuelle est ici de 1.30, ce qui indique une très grande régularité d'une année à l'autre (Fig. 6).

Etiages

La distribution des 46 débits d'étiage indiquent que l'étiage le plus soutenu est de $129\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1934), l'étiage le plus sévère est de $75\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1995) et l'étiage

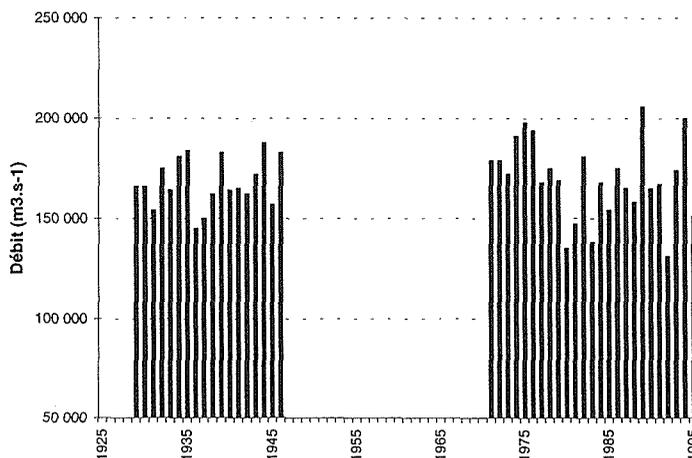


Fig. 6 Débits moyens annuels de l'Amazone à Obidos (1927-1995).

moyen est de $102\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (écart type $s = 13\,300\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, coefficient de variation $cv = 0.130$). Ces valeurs montrent, d'une part, la grande régularité des étiages d'une année à l'autre et, d'autre part, que les débits d'étiages sont extrêmement bien soutenus: rappelons que la crue décennale du Congo à Brazzaville est inférieure à l'étiage cinquantenaire de l'Amazone à Obidos.

Crués

L'étude des 55 crués annuelles indiquent que la crue la plus forte est de $380\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1953), la crue la plus faible est de $176\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ (1980) et la crue moyenne atteint $266\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ($s = 45\,600\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, $cv = 0.176$). Sur cet échantillon, il est possible d'estimer la crue centenaire avec une assez bonne précision (ajustement par les lois de Galton, Gumbell et Pearson III). Les diverses lois donnent des valeurs décennales comprises entre $352\,000$ et $443\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. La crue de 1953 serait une crue centenaire. L'excellente adaptation des lois statistiques à l'échantillon des crués observées ou estimées autorise une estimation de la crue millénaire de l'ordre de $430\,000$ à $460\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$.

CONCLUSION

Les recherches et la compilation de données anciennes, le raccordement altimétrique des différentes séries d'échelles, associés à la réalisation de jaugeages précis, permet enfin

Tableau 1 Caractéristiques hydrologiques de l'Amazone et autres grands fleuves mondiaux.

Fleuve	Lieu	Bassin versant (10^3 km^2)	Module spécifique K3 ($l\text{ s}^{-1}\text{ km}^{-2}$)	Coefficient de variation	
Mékong	Mukdahan	391	21.3	1.36	0.120
Danube	Ceatal Izmail	807	8.0	1.63	0.192
Gange	Farakka	951	11.8	2.35	0.313
Niger	Gaya	1000	1.2	1.75	0.218
Volga	Volgograd	1350	6.2	1.57	0.175
Missouri	Hermann	1368	1.7	2.40	0.329
Nil	Assouan	1550		1.62	0.185
Amour	Komsomols	1730	5.8	1.61	0.185
Léna	Kusur	2430	6.8	1.32	0.110
Ob	Salekhard	2950	4.2	1.48	0.151
Congo	Brazzaville	3475	11.5	1.31	0.107
Amazone	Obidos	4680	36.1	1.30	0.109

de caractériser le régime hydrologique de l'Amazone à Obidos, la plus importante station hydrométrique du monde. A cette station, l'Amazone présente un régime extrêmement régulier, l'un des plus réguliers du monde (Tableau 1). Cette régularité est la résultante de plusieurs facteurs:

- (a) la grande dimension du bassin versant (4 680 000 km²) où une zone de pluviométrie déficitaire va être composée, un peu plus loin, par une zone excédentaire; et
- (b) l'extension des zones inondables (várzeas) tant au Brésil (60 000 km² in Sioli, 1984) qu'en Bolivie (150 000 km² in Roche & Fernandez, 1988) ou au Pérou, qui régularise le débit de la crue (Richey *et al.*, 1989).

L'Amazone demeure le fleuve le plus puissant du Monde en terme de débit spécifique (36.1 l s⁻¹ km²). Avec une pluviométrie moyenne sur le bassin de l'Amazone à Obidos de 2520 mm année⁻¹ (Guyot *et al.*, 1994; Molinier *et al.*, 1995), le déficit d'écoulement est de 1380 mm année⁻¹.

REFERENCES

- Guimarães, V., Guyot, J. L. & Conceicao, S. (1994) Medição de descarga líquida em grandes rios. Rio Amazonas em Obidos. Relatório técnico da maior medição de descarga líquida realizada no mundo (279000 m³/s), 20 a 23 junho de 1994. Publ. DNAEE, Brasília.
- Guyot, J. L., Conceicao, S., Guimarães, V., Santos, J. B. & Longuinhos, R. (1995) Medição de vazão com ADCP. Primeiros resultados na bacia Amazonica. *A Água em Revista* 3(4), 26-30.
- Guyot, J. L., Molinier, M., de Oliveira, E., Cudo, K. J. & Guimarães V. (1994) Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone. *Rev. Géogr. Alpine* 12, 77-83.
- Jaccon, G. (1987) Jaugeage de l'Amazone à Obidos par les méthodes du bateau mobile et des "grands fleuves". *Hydrol. Continent* 2(2), 117-126.
- Le Coite, P. (1935) Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime. *Ann. Géogr.* 44, 614-619.
- Matsuyama, H., Oki, T. & Masuda, K. (1993) The water budget in the Amazon river basin during the FGGE period. In: *Hydrology in Warm Humid Regions* (Proc. Yokohama Symp., July 1993) (ed. by J. S. Gladwell), 35-42. IAHS Publ. no. 216.
- Meade, R. H. (1985) Suspended sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-84. *USGS Open File Report 85-492. Denver, USA.*
- Molinier, M., Guyot, J. L., de Oliveira, E., Guimarães, V. & Chaves, A. (1995) Hydrologie du bassin de l'Amazone. In: *Grands Bassins Fluviaux Périalantiques* (Proc. Paris Symp., Novembre 1993), 335-344. Editions ORSTOM, Paris.
- Oltman, R. E., Sternberg, H. O. R., Ames, F. C. & Davis, L. C. (1964) Amazon River Investigations. Reconnaissance Measurements of July 1963. USGS Circular 486, Washington, USA.
- Oltman, R. E. (1968) Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river. USGS Circular 552. Washington, USA.
- Pacheco da Veiga, J. (1968) Medição de descarga e seus problemas técnicos no maior rio do mundo. DNAEE, Rio de Janeiro.
- Pardé, M. (1936) Les variations saisonnières de l'Amazone. *Ann. Géogr.* 45, 502-511.
- Pardé, M. (1954) Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens. *La houille blanche* numéro spécial Déc., 823-846.
- Richey, J. E., Meade, R. H., Salati, E., Devol, A. H., Nordin, C. F. & Dos Santos, U. (1986) Water discharge and suspended sediment concentration in the Amazon river. *Wat. Resour. Res.* 22(5), 756-764.
- Richey, J. E., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Victoria, R., Forsberg, B., Tancredi, A. C. N. S. & de Oliveira, E. (1989) Sources and routing of the Amazon river flood wave. *Global Biogeochemical Cycles* 3(3), 191-204.
- Roche, M. A. & Fernandez, J. (1988) Water resources, salinity and salt yields of the rivers of the Bolivian Amazon. *J. Hydrol.* 101, 305-301.
- Rodier, J. & Roche, M. (1984) *World Catalogue of Maximum Observed Floods* (Répertoire mondial des crues maximales observées). IAHS Publ. no. 143.
- RDI (1989) Acoustic doppler current profilers. Principles of operation: a practical primer. Publ. RDI, San Diego, USA.
- Simpson, M. R. & Oltmann, R. N. (1993) Discharge-measurement system using an acoustic Doppler current profiler with applications to large rivers and estuaries. *USGS Wat. Supply Pap.* 2395. Washington, USA.
- Sioli, H. (1984) The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types. In: *The Amazon* (ed. by H. Sioli), 127-165. Junk Publ., Dordrecht, The Netherlands.

- Smoot, G. F., Cahal, D. I., & Medina, K. D. (1967) A technique for rapid measurement of flows in large streams. USGS Circular. Washington, USA.
- Tardy, Y. & Probst, J. L. (1992) Sécheresses et crises climatiques. *Encyclopaedia Universalis* **92**, 167-174.
- Tardy, Y., Mortatti, J., Ribeiro, A., Victoria, R. & Probst, J. L. (1994) Fluctuations de la pluviosité, de l'écoulement et de la température sur le bassin de l'Amazone et oscillations du climat global au cours du siècle écoulé. *C.R. Acad. Sci. Paris* **318**(2), 955-960.
- UNESCO (1971) Discharge of selected rivers of the World. Vol. 2-3. UNESCO, Paris.
- UNESCO (1995) Débit de certains cours d'eau d'Afrique. UNESCO Publ. no. 52, Paris, France.