

## 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

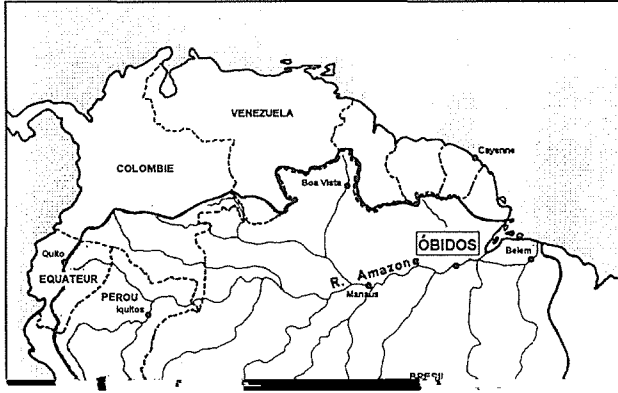
**Résumé** La station hydrométrique d'Obidos est la station la plus aval pour le

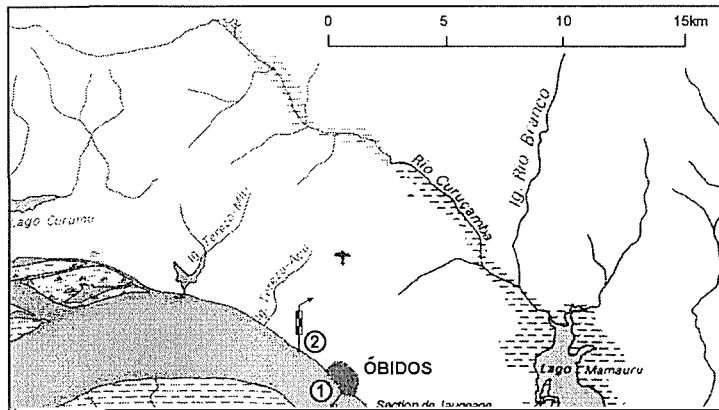
contrôle des débits de l'Amazone. Les hauteurs d'eau ont été observées à cette station de 1928 à 1948 et de 1968 jusqu'à aujourd'hui. Contrairement à ce qui a été admis pour la Décennie Hydrologique, ces deux séries n'ont pas leurs zéros calés au même niveau. Une analyse critique des jaugeages effectués 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





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<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup>, 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:

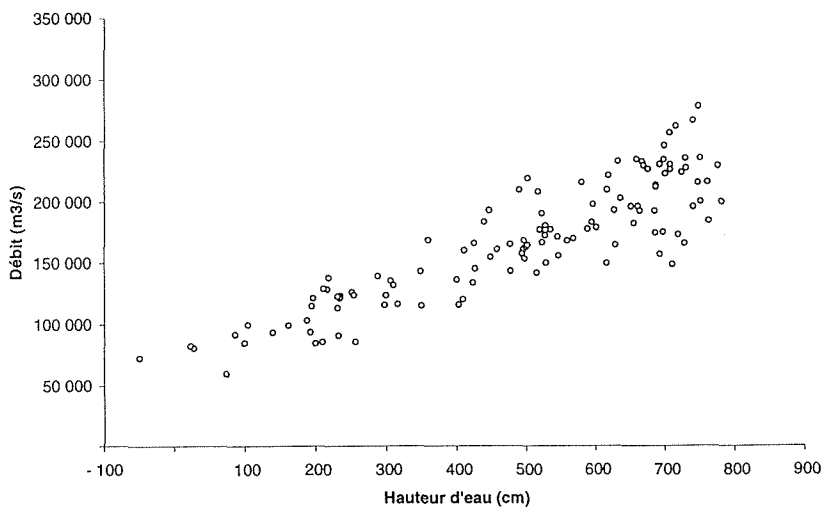
- (a) les hydrologues de l'USGS, qui ont réalisé, de 1963 à 1969, six jaugeages par la méthode "des grands fleuves" (Oltman, 1968). La mesure de la vitesse de l'eau s'effectue au moulinet hydrométrique, avec de deux à six points par verticale, et au moins 10 verticales dans la section. Le bateau n'est 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.

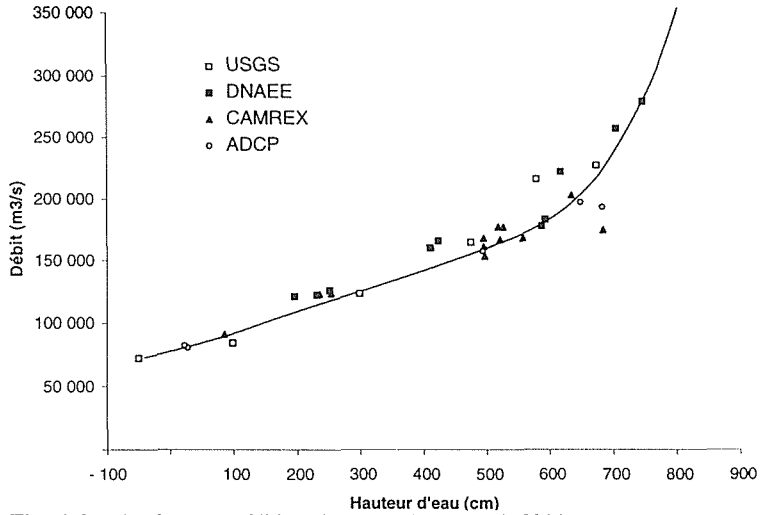


Fig. 4 Courbe de tarage débit vs hauteur, Amazonie à Obidos.

### 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  $0.3\text{ m s}^{-1}$ , 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 DEBITS 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'Amazonie.

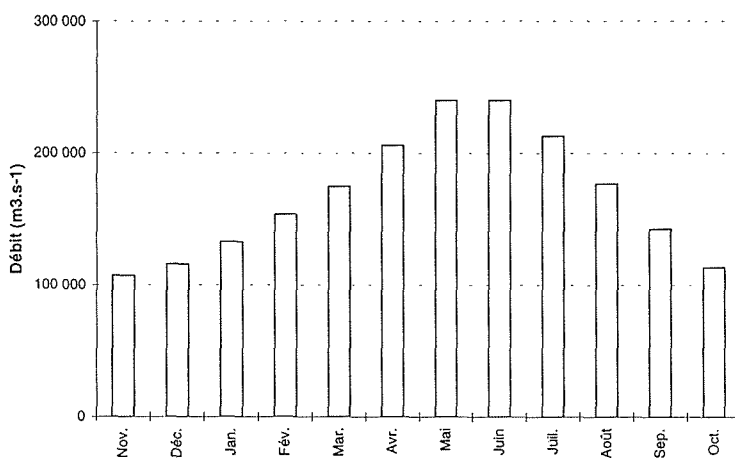


Fig. 5 Débits moyens mensuels de l'Amazone à Obidos (1927-1995).

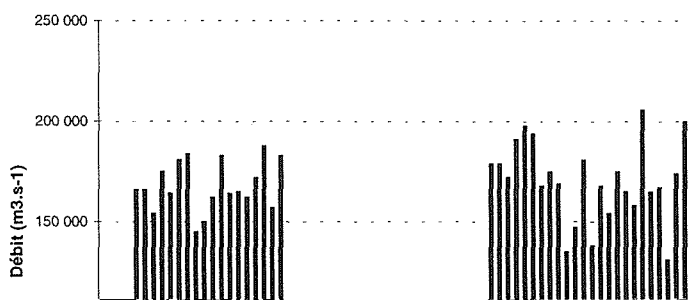
## Modules

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  $169\ 000\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$  ( $36.11\ \text{s}^{-1}\ \text{km}^{-2}$ ,  $1140\ \text{mm}\ \text{année}^{-1}$ ). 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



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 ( $10^3\text{ km}^2$ )	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

la résultante de plusieurs facteurs:

- (a) la grande dimension du bassin versant (4 680 000 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup> in Sioli, 1984) qu'en Bolivie (150 000 km<sup>2</sup> 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<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>). Avec une pluviométrie moyenne sur le bassin de l'Amazone à Obidos de 2520 mm année<sup>-1</sup> (Guyot *et al.*, 1994; Molinier *et al.*, 1995), le déficit

- 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.