

## **L'Amazone à Óbidos (Brésil): étude statistique des débits et bilan hydrologique (Publié dans Hydrol. Sci. J., 47, 321-334.)**

**JACQUES CALLEDE**

*IRD (Retraité), QE15, conj. S, casa 51, Guará II, CEP 71050-191, Brasília (DF), Brésil*  
[cld@apis.com.br](mailto:cld@apis.com.br)

**JEAN LOUP GUYOT**

*IRD, Laboratoire des Mécanismes de Transfert en Géologie, Université Paul Sabatier (LMTG-UPS), 38 Rue des 36 Ponts, F-31400 Toulouse, France*

**JOSYANE RONCHAIL**

*IRD, CP 7091 Lago Sul, CEP 71619-970, Brasília (DF), Brésil*

**MICHEL MOLINIER**

*IRD Hydrologie, BP 5045, F-34090 Montpellier Cedex, France*

**EURIDES DE OLIVEIRA**

*Agência Nacional de Águas (ANA), Setor Policial, Area 5, Quadra 3, Bloco B, CEP 70610-200 Brasília (DF), Brésil*

**Résumé** Effectuées dans le cadre du Projet Hidrologia e geoquímica na Bacia Amazônica (HiBAm), les nouvelles mesures de débit à Óbidos ont amélioré la connaissance des caractéristiques hydrologiques de l'Amazone à cette station qui contrôle les plus forts débits du monde. Une nouvelle méthode de correction détermine les débits journaliers avec une précision de  $\pm 3.0\%$ . La reconstitution des périodes manquantes, avec les observations faites à Manaus, permet de disposer d'une chronologie de près d'un siècle. Avec cet échantillon commençant en 1902, le module interannuel de l'Amazone à Óbidos est de  $163\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , avec un coefficient d'irrégularité extrêmement faible ( $K3 = 1.28$ ). L'étiage décennal ( $78\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ) est de même grandeur que la crue centenaire du Congo à Brazzaville. La crue décennale est estimée à  $260\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ . Le Bilan hydrologique indique un déficit d'écoulement de 1193 mm, qui peut être assimilé à l'évapotranspiration réelle. En conclusion, l'Amazone est bien le fleuve le plus puissant et le plus régulier de la planète.

**Mots clefs** Amazone; débit; statistique; bilan hydrologique

### **The River Amazon at Óbidos (Brazil): Statistical studies of the discharges and water balance**

**Abstract** New discharge measurements carried out within the "Hidrologia e geoquímica na Bacia Amazônica" (HiBAm) Project at Óbidos have improved the knowledge about the hydrological characteristics of the Amazon at this station, which controls the highest discharges in the world. A new correction method determines the daily discharge with an accuracy of  $\pm 3.0\%$ . The reconstruction of the missing data, using observations from Manaus, makes it possible to build a chronology for almost one century. With this sample starting in 1902, the interannual average discharge of the Amazon at Óbidos is  $163\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ , with an extremely weak irregularity coefficient ( $K3 = 1.28$ ). The decennial low water ( $78\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ ) is similar to the centenary flood of the River Congo at Brazzaville. The decennial flood is estimated to be  $260\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ . Water balance studies indicate an outflow deficit of 1193 mm, which can be identified with actual evapotranspiration. In conclusion, the Amazon is confirmed to be the most powerful and regular river of the planet.

**Key words** River Amazon; discharge; statistical studies; water balance



de l'Energie Electrique (Departamento Nacional de Águas e Energia Eléctrica—DNAEE), ont la charge de l'hydrologie au Brésil: elles participent au Projet, de même que l'Université de Brasília (UnB).

Utilisant un mesureur électronique de débit Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), les hydrologues du programme HiBAm ont réalisé sur l'ensemble du bassin amazonien, depuis 1994, plusieurs centaines de jaugeages précis sur des temps très courts (Filizola *et al.*, 1999).

## **LA STATION HYDROMETRIQUE D'ÓBIDOS**

### **Historique**

En 1927, pour les besoins de la navigation, une échelle limnimétrique était installée par la Division Hydrographique du gouvernement brésilien (actuellement Direction de l'Hydrographie et de la Navigation—DHN) sur un embarcadère du Port. Elle a été détruite par la forte crue de 1953. Les relevés s'arrêtent en 1947. L'échelle actuelle fonctionne depuis le 22 février 1968. Elle a été refaite à chaque reconstruction de l'embarcadère, mais avec son zéro toujours à la même altitude.

### **Altitude des zéros des échelles successives**

Pour l'échelle actuelle, les nivellements successifs depuis 1968, indiquent un zéro situé 8.05 m en dessous du repère Port et 8.50 m sous celui situé au Marché Municipal. Par contre, il n'a pas été possible de retrouver de document donnant le calage de l'ancienne échelle de 1927. En 1963, l'US Geological Survey (Oltman, 1968) a essayé de reconstituer le zéro, avec une précision altimétrique de  $\pm 10$  cm. Normalement, il aurait dû être à la même altitude que celui de l'échelle actuelle. C'est avec pareille hypothèse que les débits de la période 1927–1947 ont été calculés à l'occasion de la Décennie Hydrologique Internationale (UNESCO, 1969–1979).

Le décalage entre ancienne échelle et échelle actuelle a fait l'objet de cinq estimations (observateur de la station, délaissé de crue, corrélation Manaus/Óbidos, jaugeage Oltman de novembre 1963, valeurs moyennes des modules à Óbidos pour les périodes 1928–1941 et 1970–1991) allant de 28 à 42 cm, la valeur la plus probable étant 34 cm, l'échelle ancienne étant calée plus haut que l'échelle actuelle. Ceci situe le zéro de l'ancienne échelle à 7.71 m en dessous du repère du Port et à 8.16 m en dessous de celui du Marché Municipal. Pour la conversion en débits des hauteurs d'eau de l'ancienne échelle, les relevés limnimétriques sont majorés de ces 34 cm.

### **Relevés hydrométriques**

Les données utilisées proviennent de la banque de données hydrométriques de l'ANEEL. La continuité de l'hydrogramme a été vérifiée année par année par visualisation graphique: aucune erreur n'a été décelée. Ce même contrôle a été effectué pour les stations de Manaus (située à 567 km en amont d'Óbidos), Parintins (157 km en amont), Santarém (129 km en aval) et Taperinha (46 km en aval de Santarém). Les corrélations linéaires, pour les hauteurs d'eau des étiages et des crues, ont été déterminées entre elles et avec celles d'Óbidos. Ces corrélations sont très fortes (moyenne des coefficients de corrélation  $r = 0.953$ ).

### Conversion des hauteurs en débits

L'établissement de la relation hauteur-débit à Óbidos a fait l'objet d'une étude spécifique (Callède *et al.*, 2001). En basses et moyennes eaux, la relation peut être considérée comme univoque. En hautes eaux, il convient de multiplier le débit univoque ( $Q_0$ ) par un coefficient ( $K$ ) fonction de la hauteur d'eau aux échelles d'Óbidos et de Santarém. En contrôle, cette opération est répétée ensuite en utilisant Óbidos et Parintins. Les débits corrigés ont permis d'établir une courbe de tarage univoque «probable» qui est utilisée en absence de mesure de hauteur d'eau à Santarém (par exemple, pour déterminer les débits d'étiage et de crue de 1902 à 1927 et de 1948 à 1968). La Fig. 2 représente les diverses courbes de tarage.

L'ancien tarage a été établi antérieurement à l'emploi du matériel de mesure ADCP (1994). Depuis 1994, 26 jaugeages à l'ADCP ont été effectués, dont quatre séries de mesures en très hautes eaux (mai et juin 1997, juin et juillet 1999). La nouvelle méthode de conversion des hauteurs en débits a réduit la dispersion à 3.0% (elle était de 5.8% auparavant). L'hydrogramme de chaque année est tracé entre les hydrogrammes obtenus par la courbe de tarage univoque, par la correction avec Santarém et par la correction avec Parintins. Les jaugeages de l'année guident le choix. La dispersion moyenne entre

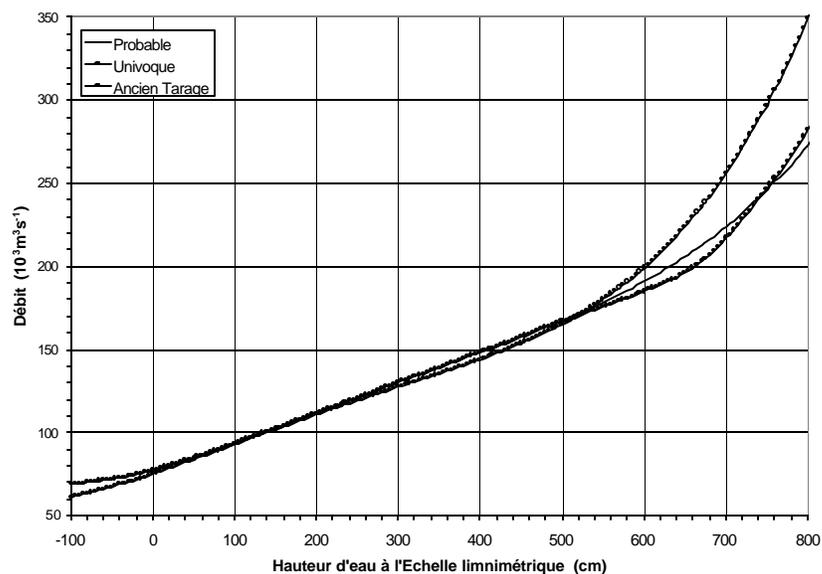


Fig. 2 Les courbes de tarage de l'Amazone à Óbidos.

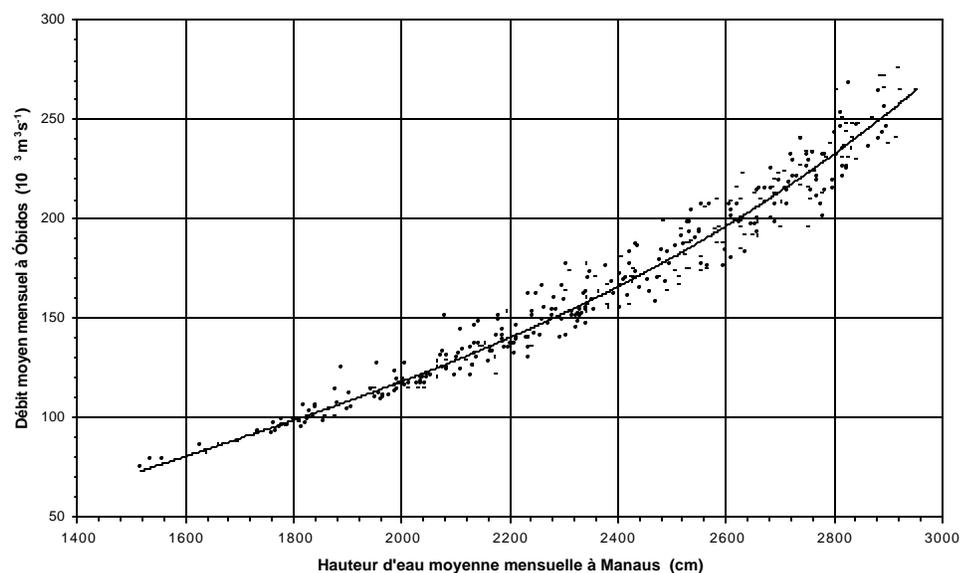
hydrogramme et jaugeage est de 2.9%.

### Débit dans le lit majeur

Au droit de la station hydrométrique d'Óbidos, le lit majeur se situe uniquement en rive droite. Ce lit majeur (étude en cours), d'une largeur maximale de 40 km, est parsemé par un réseau de lacs qui communiquent entre eux et avec l'Amazone par des chenaux («igarapés») qui coulent dans les deux sens. Durant la crue, le remplissage se fait en amont d'Óbidos (débit de l'ordre de  $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) et surtout en aval. Le débit de vidange est d'environ  $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . L'influence du lit majeur peut être considérée, jusqu'à preuve du contraire, comme négligeable.

### Reconstitution des débits à partir de la Station de Manaus

La station hydrométrique du Port de Manaus est, sans aucun doute, une des meilleures d'Amérique du Sud. Les relevés limnimétriques quotidiens, sans aucune lacune et de bonne qualité, commencent le 15 septembre 1902. Et, fait rarissime en hydrométrie, le zéro de l'échelle est toujours resté à la même altitude depuis 1902. Malgré les 567 km séparant Óbidos de Manaus, la corrélation linéaire entre les hauteurs d'eau moyennes mensuelles de Manaus et les débits moyens mensuels à Óbidos, pour la période 1968–1999 est très forte (coefficient de détermination  $r^2 = 0.958$ ). Ceci s'explique par le fait qu'à Manaus le niveau du Rio Negro est influencé par les rios Solimões et Madeira (Cappelaere *et al.*, 1996). La somme des superficies de ces trois bassins versants atteint  $4\,256\,000 \text{ km}^2$  pour  $4\,676\,000$  à Óbidos, ce qui fait que le total des débits de ces trois fleuves est pratiquement identique à celui d'Óbidos.



**Fig. 3** Corrélation entre les hauteurs moyennes mensuelles à Manaus et les débits moyens mensuels à Óbidos.

**Tableau 1** Variation de la dispersion en fonction de la hauteur d'eau à Manaus.

	Hauteur à Manaus (m):						
	15–17	18–19	20–21	22–23	24–25	26–27	28–29
Nombre d'observations	17	40	64	71	69	81	42
Dispersion moyenne ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	1.82	3.70	5.15	6.94	8.68	8.98	10.2
Dispersion moyenne (%)	2.07	3.35	3.91	4.46	4.78	4.28	4.10
Dispersion maximale (%)	5.98	14.2	15.9	13.3	11.5	14.3	11.8

Un ajustement polynomial de degré 3 (Fig. 3) s'avère plus adapté qu'un ajustement linéaire, avec un  $r^2$  égal à 0.961. La répartition des 382 écarts entre les valeurs observées et calculées indique que 95% de l'échantillon est compris entre 0 et  $18\,700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (ou, en pourcentage du débit mensuel, entre 0 et 9.8%). La Fig. 3 et le Tableau 1 montrent que l'écart entre valeur calculée et valeur observée augmente avec la hauteur d'eau à Manaus (effet d'hétéroscédasticité). Ramenée en pourcentage du débit mensuel observé, cet écart se stabilise très vite aux environs de 4% (soit une valeur à peine supérieure à l'erreur à craindre sur la relation hauteur-débit: 3%). Le test de Fischer ( $p = 0.70$ ) n'est pas significatif. Rappelons que ce test est le rapport entre la variance expliquée (rapportée à son nombre de liberté) par la variance résiduelle (rapportée de même à son nombre de liberté),  $p$  étant la probabilité de dépassement. Ici ce test indique que les variances des deux séries (observées et calculées) ne sont pas significativement différentes et que la variance résiduelle est faible. Ceci est la caractéristique d'un bon modèle.

Du fait du caractère cyclique annuel, l'autocorrélation des valeurs abaisse le degré de liberté des séries et relève le seuil de significativité des tests et pourrait remettre en question les résultats précédents. Néanmoins, l'analyse entre les valeurs désaisonnalisées de hauteurs d'eau à Manaus et de débits à Óbidos donne également des résultats très significatifs ( $r^2$  de l'ordre de 0.895) qui montrent l'importance de la relation entre les deux stations en dehors de l'effet saisonnier. Ces résultats sont cependant moins bons que ceux de l'analyse précédente qui sont par conséquent conservés pour la suite du travail.

### Reconstitution des débits de crue et d'étiage

La reconstitution des débits de crue utilise, d'une part, les excellentes corrélations linéaires existantes entre les hauteurs de crues d'Óbidos, Manaus, Taperinha et Santarém, en déterminant les hauteurs manquantes à Óbidos et en utilisant, ensuite, la courbe de tarage univoque «probable». D'autre part, à Óbidos, la corrélation entre débit de crue et débit mensuel maximal de l'année est excellente ( $r = 0.996$ ) ce qui permet de calculer, à l'aide de cette corrélation, le débit de crue manquant. L'écart entre ces deux déterminations étant des plus minimes, la valeur moyenne est adoptée. La méthode utilisée pour la reconstitution des étiages est la même que pour les crues, à la différence que la corrélation ( $r = 0.973$ ) est établie entre le débit moyen mensuel minimum et le débit d'étiage. La reconstitution de l'année 1926 peut paraître suspecte à cause de la faiblesse du débit moyen de cette année là et de celui de sa crue. Mais cette faiblesse est causée par la pluviométrie déficitaire de 1926

sur l'ensemble du Bassin (observations météorologiques de Cuiaba, Manaus, Santarém et São Gabriel da Cachoeira).

### ETUDE STATISTIQUE DES DEBITS DE L'AMAZONE A ÓBIDOS

L'année hydrologique commence au 1 novembre. Le régime est unimodal (Pardé, 1954). La dissymétrie entre montée des eaux et décrue n'est pas très marquée: la montée des eaux dure sept mois et la décrue cinq, comme l'indique la Fig. 4. Les débits de la période 1902–1999

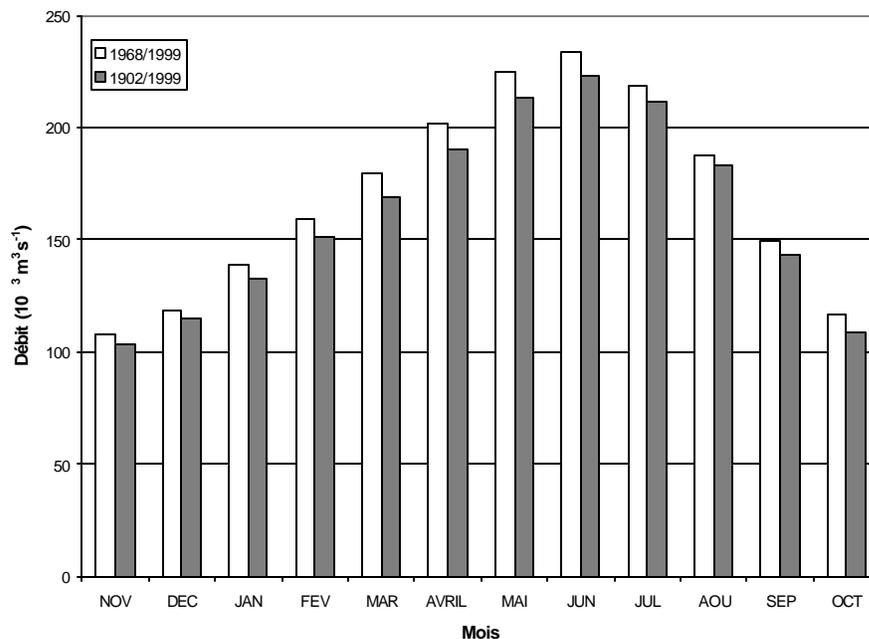


Fig. 4 Evolution des débits moyens mensuels à Óbidos.

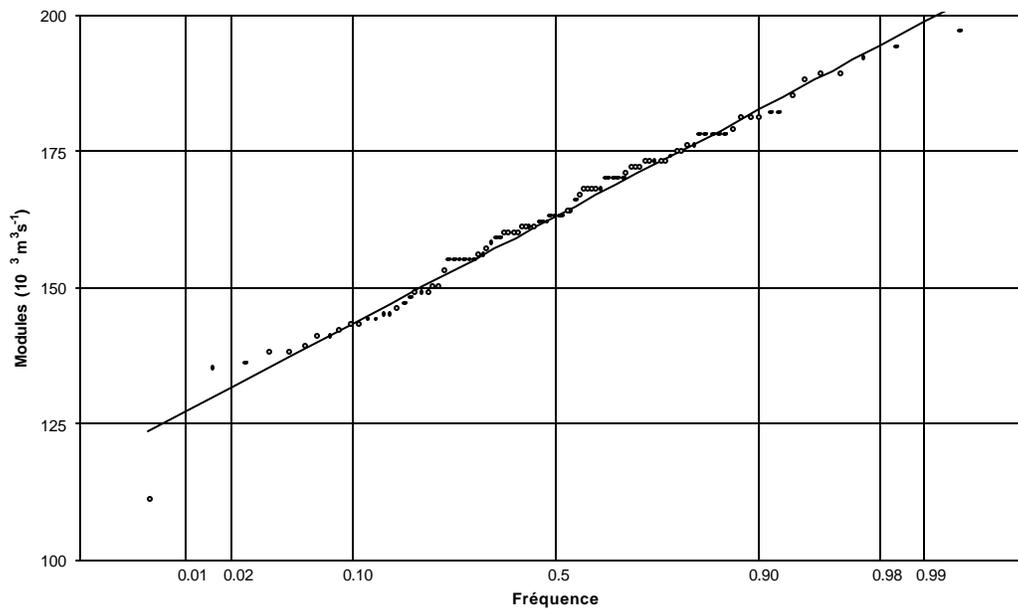
sont légèrement inférieurs à ceux de la période 1968–1999. Aussi les études statistiques seront faites sur l'échantillon observé 1968–1999 (soit 32 années d'observation) et sur l'échantillon complété 1902–1999.

#### Les modules

La distribution des modules (Tableau 2 et Fig. 5) suit une loi normale (loi de Gauss). Appelé «coefficient d'irrégularité interannuelle», le coefficient  $K3$  représente le rapport entre le débit de l'année décennale humide et celui de l'année décennale sèche (Roche, 1963). Le module interannuel avait été estimé à 100 000–110 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> dès 1954 (Pardé, 1954) sans aucune mesure complète de débit et réajusté à 166 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en 1992 (Molinier *et al.*, 1992), puis à 169 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en 1994 (Guyot *et al.*, 1994) à partir des premières mesures de débit du programme HiBAm. Avec la nouvelle courbe d'étalonnage de la station, le module interannuel de l'Amazonie à Óbidos est de 163 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pour la période 1903–1999, alors qu'il est de 170 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pour la période 1968–1999, à cause de l'augmentation des

**Tableau 2** Distribution des modules à Óbidos.

Période	Années	Module ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Ecart-type ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Débit spécif. ( $\text{l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ )	Décennale sèche (mm)	Décennale humide (mm)	K3
1968–1999	32	170	$\pm 15.4$	36.2	150	190	1.26
1903–1999	97	163	$\pm 15.2$	34.7	143	183	1.28

**Fig. 5** Distribution des modules à Óbidos (échantillon complété).

modules au cours de ce siècle (étude en cours). Le débit spécifique est de  $36.2 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  (période 1968–1999) ou  $34.7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$  (période 1903–1999).

### Les étiages

Les hydrogrammes d'Óbidos indiquent que les étiages (Tableau 3 et Fig. 6) apparaissent entre le 17 octobre et le 25 décembre (jour le plus probable: 9 novembre). C'est donc le 1 novembre que débute l'année hydrologique. Une distribution suivant la loi de Galton (appelée

**Tableau 3** Distribution des étiages à Óbidos.

Période	Années	Loi	Débit ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) pouvant ne pas être atteint une année sur:				
			2	5	10	50	100
1968–1999	32	Galton	101	87.5	80.4	68.2	64.0
		Gumbel	99.0	86.4	81.1	73.2	70.7
		Jenkinson	101	85.8	78.8	67.4	63.5
1902–1999	98	Galton	94.1	82.9	78.0	70.5	68.2
		Gumbel	93.5	82.7	78.1	71.2	69.1
		Jenkinson	93.9	82.5	77.5	69.8	67.4

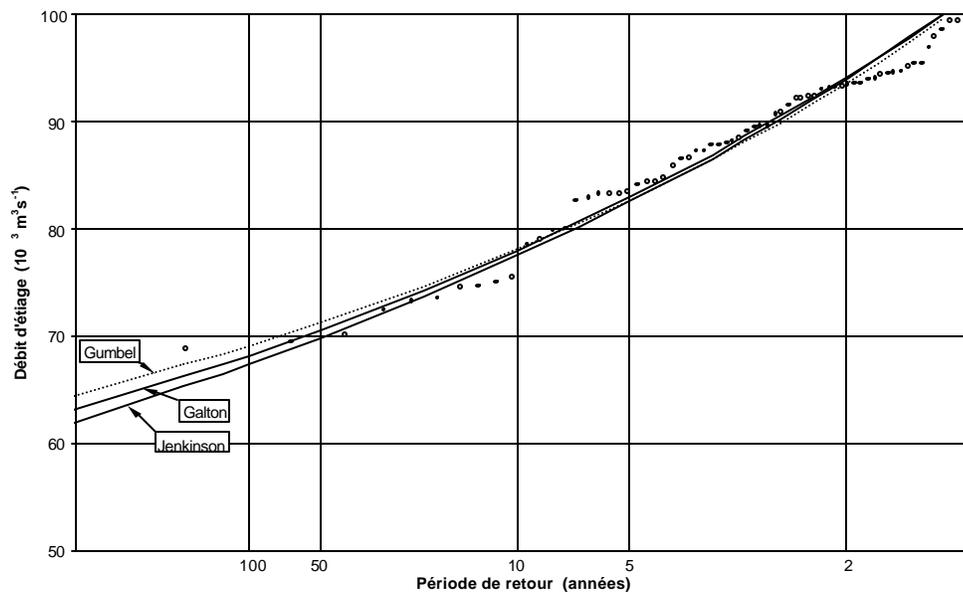


Fig. 6 Distribution des étiages à Óbidos (échantillon complété).

aussi loi log-normale) est souvent la mieux adaptée pour les étiages. C'est ici le cas et c'est pour cette raison que les résultats de la distribution de Galton sont indiqués *en italique* dans le Tableau 3.

### Les crues

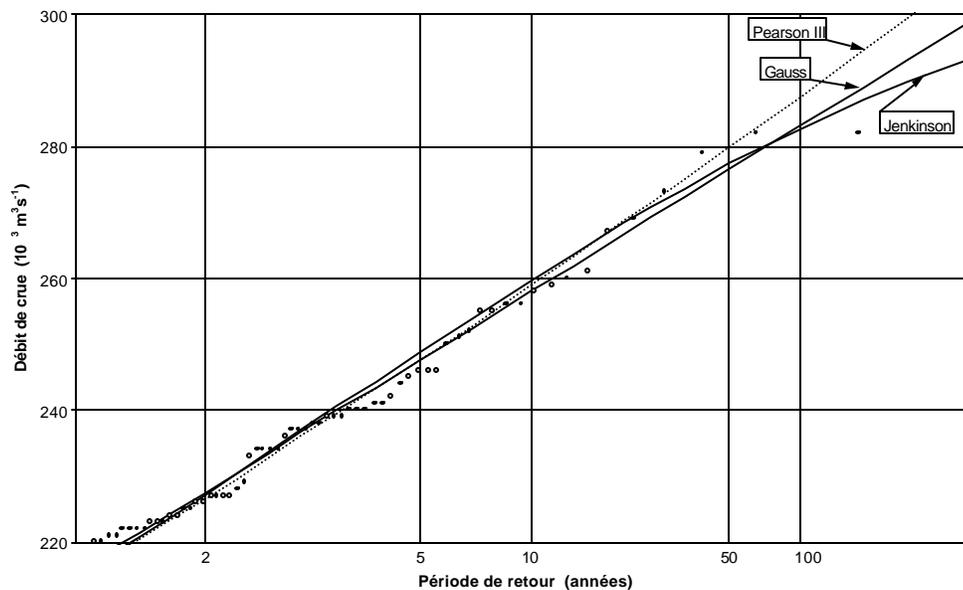
L'étude des crues de l'Amazonie (Tableau 4 et Fig. 7) est assez délicate puisqu'elle traite des plus forts débits observés du monde. Une difficulté supplémentaire provient du fait que la courbe d'étalonnage de cette station n'est pas univoque pour les forts débits, ce qui peut conduire à une hiérarchie des débits un peu différente de la hiérarchie des hauteurs. Les hydrogrammes d'Óbidos indiquent que le débit maximal de crue se situe entre le 4 mai et le 18 juin (jour le plus fréquent: 28 mai). Les lois statistiques qui s'appliquent le mieux aux deux échantillons sont celles de Gauss, Pearson III et Jenkinson. Par sa tendance asymptotique, la distribution de Jenkinson (résultats indiqués *en italique* dans le Tableau 4) paraît, ici, la mieux adaptée à la morphologie du lit majeur. La crue millénaire est estimée entre 300 000 et 330 000  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

### BILAN HYDROLOGIQUE

L'établissement du bilan hydrologique (Tableau 5) implique la connaissance de la pluviométrie moyenne, année par année sur l'ensemble du bassin amazonien. Le calcul concerne la période 1969–1992. L'année de début, 1969, a été choisie du fait que la station hydrométrique n'a été réinstallée qu'en 1968. L'année de fin (1992) est celle de l'arrêt du fichier NOAA/GHCN. Quarante-six postes pluviométriques sont concernés et ce sont des

**Tableau 4** Distribution des crues à Óbidos.

Période	Années	Loi	Débit ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) pouvant être atteint ou dépassé une année sur:				
			2	5	10	50	100
1968–1999	32	Gauss	239	261	272	292	299
		Pearson III	238	260	272	295	303
		Jenkinson	240	265	277	296	302
1903–1999	97	Gauss	227	248	258	277	283
		Pearson III	227	248	259	280	287
		Jenkinson	227	249	260	277	283

**Fig. 7** Distribution des crues à Óbidos (échantillon complété).

stations météorologiques synoptiques observées par des professionnels: 28 sont situées au Brésil, cinq au Pérou, quatre en Bolivie, trois en Colombie, trois en Equateur, deux au Venezuela et une au Surinam. Les valeurs mensuelles de la pluviométrie proviennent soit des archives des services météorologiques nationaux, soit du fichier NOAA/GHCN (Wotling & Mahé, 1994).

Il peut paraître anormal que si peu de stations aient été utilisées, surtout au Brésil, là où il existe environ 500 postes pluviométriques sur le bassin amazonien. Mieux vaut se contenter de postes pluviométriques synoptiques bien observés et généralement bien répartis pour les besoins de la prévision météorologique. Toutes les stations de la «selva» amazonienne de cette catégorie ont été utilisées. Les autres postes pluviométriques sont mal répartis, fractionnaires et de qualité douteuse et leurs données n'apporteront rien pour améliorer la précision sur la pluviométrie moyenne annuelle. Finalement, les résultats du bilan (Tableau 5) montrent qu'il n'est pas nécessaire d'avoir davantage de stations. Les autres hydrologues et climatologues, travaillant sur la pluviométrie moyenne du bassin, n'ont utilisé seulement qu'une trentaine de postes.

**Tableau 5** Bilan hydrologique à Óbidos (période 1969–1992).

Année hydrologique	Module annuel ( $10^3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )	Lame équivalente (mm)	Pluie moyenne (mm)	Déficit d'écoulement (mm)	Coeff. d'écoulement (%)
1969/70	162	1104	2335	1231	47.3
1970/71	178	1213	2385	1172	50.8
1971/72	179	1219	2329	1110	52.4
1972/73	176	1199	2478	1279	48.4
1973/74	189	1288	2485	1197	51.8
1974/75	192	1308	2558	1250	51.1
1975/76	185	1260	2487	1227	50.7
1976/77	172	1172	2465	1293	47.5
1977/78	181	1233	2431	1198	50.7
1978/79	173	1179	2212	1033	53.3
1979/80	141	961	2228	1267	43.1
1980/81	159	1083	2363	1280	45.8
1981/82	181	1233	2507	1274	49.2
1982/83	145	988	2217	1229	44.6
1983/84	170	1158	2377	1219	48.7
1984/85	160	1090	2205	1115	49.4
1985/86	179	1219	2437	1218	50.0
1986/87	173	1179	2275	1096	51.8
1987/88	163	1110	2300	1190	48.3
1988/89	194	1322	2652	1330	49.8
1989/90	168	1145	2269	1124	50.4
1990/91	170	1158	2216	1058	52.3
1991/92	136	927	1987	1060	46.6
Moyennes	<b>171</b>	1163	2356	<b>1193</b>	49.3

Les valeurs annuelles sont vérifiées par la méthode du vecteur régional (Hiez, 1977; Brunet-Moret, 1979; L'Hôte, 1986), qui permet de déceler les erreurs grossières lorsque l'écart entre le vecteur et la station pluviométrique dépasse trois écarts-types. La méthode éprouvée des polygones de Thiessen (Thiessen, 1911) est utilisée pour obtenir la pluviométrie moyenne annuelle. La valeur du déficit d'écoulement (1193 mm) est proche des 1127 mm pour le Rio Madeira au confluent avec l'Amazone (Molinier *et al.*, 1992) et des 1270 mm pour le Rio Negro à Manaus (Guyot *et al.*, 1994). Pour l'immense bassin amazonien, il est possible d'admettre que les pertes par infiltration (ou autres) d'une zone seront compensées par les apports d'une autre et que le déficit d'écoulement moyen (1193 mm) de ces 23 années représentera l'évapotranspiration réelle. Cette valeur est en accord avec la plupart des travaux de divers bioclimatologues (Salati, 1985).

## CONCLUSION

Deux mots caractérisent le régime de l'Amazone à Óbidos : puissance et régularité.

**Tableau 6** Caractéristiques de quelques fleuves (UNESCO, 1969–1979).

Fleuve	Station	Superficie du bassin (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> )	Module (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	K3	Débit spécifique (l s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> )
Congo	Brazzaville	3 475	40 600	1.31	11.7
Nil	Assouan			1.62	
Niger	Onitsha	1 100	5 740		5.22
Missouri	Harman	1 368	2 300	2.4	1.66
Orénoque	(embouchure)	945	31 700		33.5
Parana	(embouchure)	2 600	15 800		6.10
Amour	Komsomolsk	1 730	10 000	1.61	5.76
Léna	Kusur	2 430	3 200	1.32	6.77
Ob	Salekhard	2 960	12 500	1.48	4.23
Volga	Volgograd	1 350	8 400	1.57	6.21
Danube	Ceatal Iamaï I	807	6 400	1.63	7.99
Gange	Faraka	961	11 300	2.35	11.8
Yang-tsé -Kiang				17.6	
<b>Amazone</b>	<b>Óbidos</b>	<b>4 676</b>	<b>163 000</b>	<b>1.28</b>	<b>34.7</b>

### Puissance

Le module de 163 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (période 1902–1999) est, sans équivoque, le plus important au monde: le Congo ne vient qu'en seconde position, avec 40 600 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> seulement (Tableau 6). Par contre le débit spécifique (34.71 s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>) est suivi de près, sinon dépassé, par l'Orénoque, dont le bassin versant n'est que de 945 000 km<sup>2</sup>. Les étiages sont extrêmement bien soutenus: la valeur décennale (période 1902–1999), 78 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, est de même ordre de grandeur que la crue, au moins centenaire, du Congo (70 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) à Brazzaville en 1961 (Feymans, 1962). La valeur de la plus forte crue, cependant «monstrueuse», est en très forte diminution par rapport à celle annoncée dans une publication précédente (Callède et al., 1997). Ceci vient du rétablissement du niveau de la crue de 1953 à sa vraie valeur et à une meilleure définition de la relation hauteur–débit en hautes eaux. Le laminage de la crue à Óbidos est très important: le lit mineur coule pratiquement au même niveau que le lit majeur. La crue un peu forte provoque tout d'abord une invasion des chenaux («iguarapés») qui coulent dans les deux sens et un remplissage de la myriade de lacs, petits ou grands, du lit majeur. Si la crue est plus importante, il y a inondation dans la plaine amazonienne, qu'a su si bien décrire Le Cointe (1935).

### Régularité

Avec un coefficient d'irrégularité interannuelle *K3* de 1.28 l'Amazone est le fleuve le plus régulier au monde. Sur cet immense bassin, chaque zone de pluviométrie déficitaire est compensée par une zone excédentaire. Sauf accident dans la circulation météorologique générale à l'échelle mondiale, il est peu probable que la pluviométrie annuelle sur le bassin amazonien varie beaucoup d'une année à l'autre. Comme le coefficient d'écoulement est

pratiquement constant, le volume ruisselé ne présentera pas de grosses variations. D'autre part, les plaines d'inondation ont une superficie énorme, estimée à 300 000 km<sup>2</sup> (Junk, 1997), soit 6.5% de la superficie du bassin versant. Elles écrètent la crue (une importante augmentation de niveau en amont se traduira, à Óbidos, par une faible montée des eaux) et leur vidange soutient les étiages. Cette régularité se retrouve également dans l'établissement du bilan hydrologique: déficits d'écoulement et coefficients d'écoulement sont pratiquement constants d'une année à l'autre. L'étude statistique a montré une légère augmentation des débits depuis 1902. Ceci fera l'objet d'une prochaine étude.

## REFERENCES

- Brunet-Moret, Y. (1979) Homogénéisation des précipitations. *Cah. ORSTOM sér. Hydro.* **XVI**(3-4), 147-170.
- Callède, J., Guyot, J. L., Molinier, M., Guimarães, V., Oliveira, E. de & Filizola, N. P. (1997) La variabilité des débits de l'Amazone à Óbidos (Amazonas, Brésil). In: *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty* (ed. par D. Rosbjerg, N.-E. Boutayeb, A. Gustard, Z. W. Kundzewicz & P.F. Rasmussen) (Proc. Rabat Symp. S1, April-May, 1997), 163-172. IAHS Publ. no. 240.
- Callède, J., Kosuth, P. & Oliveira, E. de (2001) Etablissement de la relation hauteur-débit de l'Amazone à Óbidos: méthode de la dénivelée normale à «géométrie variable». *Hydrolog. Sci. J.* **46**(3), 451-463.
- Cappelaere, B., Lubès-Niel, H., Berkhoff, C., Thépat, H., Guyot, J. L., de Oliveira, E. & Rodrigues, M. (1996) Prévisions des crues de l'Amazone. In: *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement* (ed. par P. Chevalier & B. Pouyaud) (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), 355-366. IAHS Publ. no. 238.
- Feymans, G. (1962) Note sur la crue du fleuve Congo en 1961. *Bull. de l'Acad. Royale des Sci. Outre-Mer* 1962, 293-297.
- Filizola, N. P., Guimarães, V. & Guyot, J. L. (1999) Medição de vazão em grandes rios com o uso do perfilador Doppler-acústico de corrente (Mesures de débit dans les grands fleuves en employant le système acoustique Doppler de mesure des vitesses, résumé en anglais). In: *Hydrological and Geochemical Processes in Large-scale River Basins* (Symposium Manaus'99, IRD, Brasília, Brésil). CD-ROM.
- Guyot, J.L., Molinier, M., Oliveira E. de, Cudo, K. J. & Guimarães, V. (1994) Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone. *Rev. Géogr. Alpine* **12**, 77-83.
- Hiez, G. (1977) L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM sér. Hydro.* **XIV**(2), 129-172.
- Junk, W.J. (1997) General aspects of floodplain ecology with special reference to the Amazonian floodplains. In: *The Central Amazon Floodplain; Ecology of a Pulsing System* (ed. by W.J. Junk), 3-20. Ecological Studies Series no. 126, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Le Coite, P. (1935) Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime. *Ann. Géogr.* **44**, 614-619.
- L'Hôte, Y. (1986) Contrôle de la qualité et de l'homogénéité des données pluviométriques par la méthode du vecteur des indices annuels de précipitation. In: *Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'Orstom à Montpellier* (16 et 17 septembre 1986), 37-52. Collection Colloques et Séminaires de l'Orstom, Paris, France.
- Molinier, M., Oliveira, E. de, Cudo, K. J. & Guimarães, V. (1992) Disponibilidade de água na bacia amazônica (Disponibilité de l'eau sur le bassin amazonien). In: *Segundo Simpósio Internacional de Estudos ambientais em Florestas* (Forest'92, Rio de Janeiro, Brésil).
- Oltman, R. E. (1968) Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. US Geol. Survey Circular no. 552, Washington DC, USA.
- Pardé, M. (1954) Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens. *La Houille Blanche*, numéro spécial, décembre 1954, 823-846.
- Roche, M. (1963) *Hydrologie de Surface*. Gauthier-Villars, Paris, France.
- Salati, E. (1985) The climatology and hydrology of Amazonia. In: *Amazonia* (ed. by G. T. Prance), 18-48. Pergamon, Oxford, UK.
- Thiessen, A. H. (1911) Precipitation averages for large areas. *Mon. Weath. Rev.* **39**, 1082-1084.
- UNESCO (1969-1979) Débit de certains cours d'eau du Monde (5 vols). Publ. no. 5, UNESCO, Paris, France
- Wotling, G. & Mahé, G. (1994) Les données pluviométriques mondiales du Fichier GHCN. *La Gazette no. 29*, Orstom, Laboratoire d'Hydrologie, Montpellier, France.

