

Evolution du débit de l'Amazone à Óbidos de 1903 à 1999

JACQUES CALLÈDE

retraité de l'IRD, QE15, conj. S, casa 51, GUARA II, CEP 71050-191 Brasília Distrito Federal, Brasil

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 (Distrito Federal), Brasil

YANN L'HÔTE, HÉLÈNE NIEL

IRD-Maison des Sciences de l'Eau, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France

EURIDES DE OLIVEIRA

Agência Nacional de Águas (ANA), Setor Policial, Area 5, Quadra 3, Bloco L, CEP 70610-200 Brasília (Distrito Federal), Brasil

Résumé La série chronologique de 97 valeurs annuelles, observées ou reconstituées, des débits de l'Amazone à Óbidos montre une légère augmentation des modules (9%) de 1903 à 1999 et des crues (10%). Tant pour les modules que pour les crues, tous les tests de rupture indiquent une cassure en 1970. L'évolution des coefficients de variation montre une diminution de la dispersion interannuelle des modules et des crues, de 1927 à 1970. La comparaison de l'évolution des modules avec la pluviométrie moyenne annuelle du bassin, de 1945 à 1998, indique une bonne corrélation pluie-débit. Enfin l'analyse de l'évolution des modules et des pluviométries moyennes annuelles, en pourcentage de l'écart à leurs valeurs moyennes 1945–1998, met en évidence une augmentation de l'écoulement par rapport à la pluie tombée, qui pourrait être la conséquence de la déforestation amazonienne.

Mot clefs analyse statistique; débits; pluviométrie; déforestation; Amazone

Evolution of the River Amazon's discharge at Óbidos from 1903 to 1999

Abstract The time series of 97 annual values, observed or reconstituted, of runoff of the River Amazon at Óbidos shows a slight increase of 9% in the mean annual discharges from 1903 to 1999, and of 10% for the floods. All the rupture tests indicate a break in 1970, for the mean annual discharges as well as for the floods. The evolution of the coefficients of variation indicates a reduction in the interannual variability of the mean discharges and floods, from 1927 to 1970. The comparison between the evolution of the mean annual discharges and the average annual rainfall of the basin, from 1945 to 1998, exhibits a good correlation between precipitation and runoff. Finally, the analysis of the evolution of the mean annual discharge and the average annual rainfall, expressed as a percentage of the deviation from the 1945–1998 averages, demonstrates an increase in the flow in relation to the rainfall, which could be the consequence of the Amazonian deforestation.

Key words statistical analysis; discharge; rainfall; deforestation; River Amazon

INTRODUCTION

Située à près de 800 km de l'Océan Atlantique (Fig. 1), Óbidos est la seule et unique station, aujourd'hui étalonnée, capable de déterminer les débits de l'Amazone. Mais cette détermination est très récente (1997). Le premier jaugeage complet date de juillet 1963 (Oltman, 1968): l'importance du résultat a fait traiter de "monstrueux" les débits de l'Amazone par Pardé (1965). Mais c'est surtout depuis 1980 que les campagnes systématiques de mesure ont lieu. Elles se sont amplifiées, en 1991, dans le cadre du Projet HiBAm (Hidrologia e geoquímica na Bacia Amazônica) qui regroupe l'Agência Nacional de Água – Agence Nationale des Eaux – (ANA) et l'Université de Brasília (UnB) pour la part brésilienne et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour le côté français.

L'apparition du mesureur ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), en 1995, a grandement facilité le travail de l'hydrologue. Tout ceci a permis d'établir une relation hauteur-débit de bonne qualité (Callède *et al.*, 2001) même si la station n'est plus univoque en hautes eaux. La transformation des hauteurs d'eau en débits a été complétée en utilisant une extrapolation Óbidos-Manaus dans le but d'obtenir un échantillon commençant en septembre 1902 (Callède *et al.*, 2002).

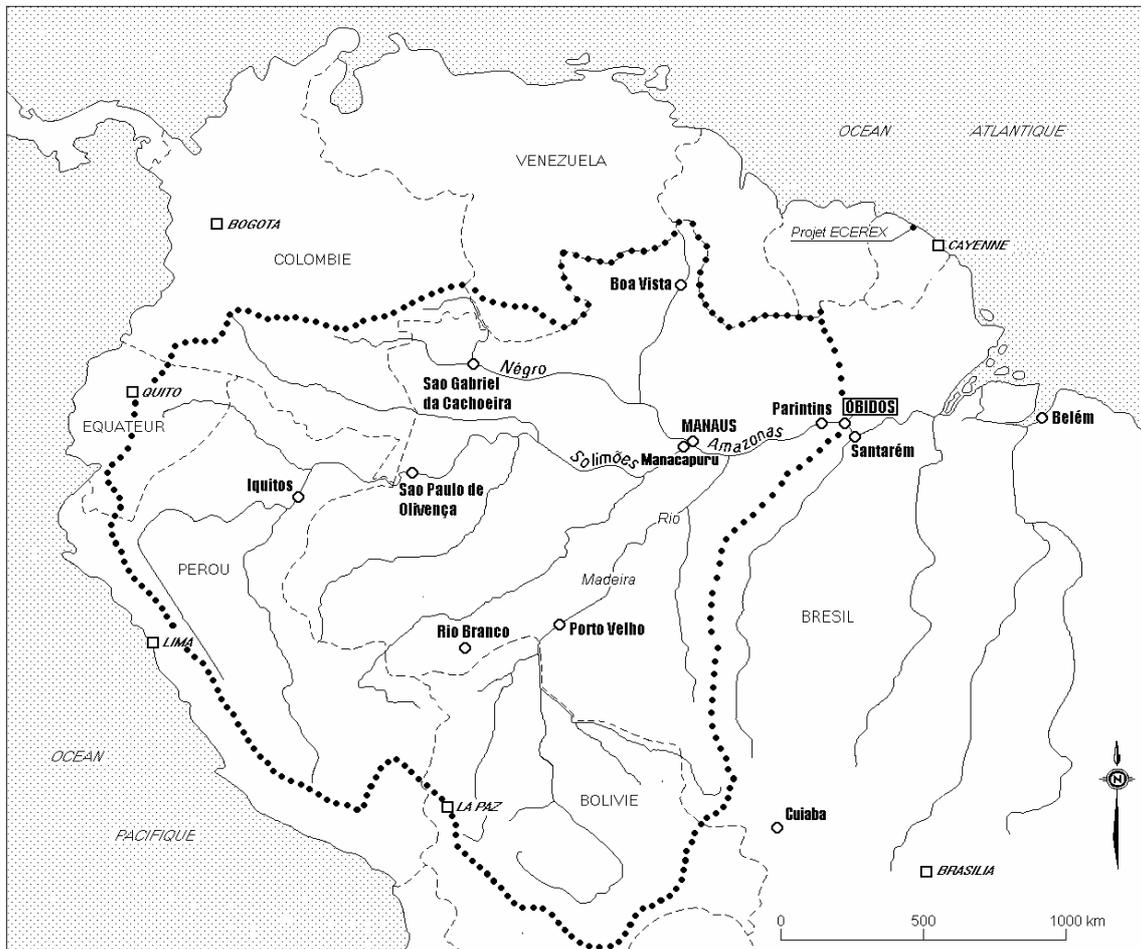


Fig. 1 Carte du bassin amazonien limité à Óbidos.

Rappelons que l'Amazonie ne commence qu'au confluent des rios Negro et Solimões, à 15 km en aval du Port de Manaus (où une station hydrométrique est observée depuis 1902). Le niveau du Rio Negro est influencé par le Rio Solimões et la relation hauteur-débit n'a jamais été établie. Il en est de même pour le Rio Solimões à Manacapuru (station située à 70 km à l'ouest de Manaus). De ce fait, il n'existe aucune autre station, sauf en haut des bassins, susceptible de déterminer les débits des tributaires de l'Amazonie avec une précision acceptable et disposant d'une sérieuse chronique de hauteurs d'eau sur au moins 30 ans.

La station d'Óbidos (01°56'S–055°30'W) draine un bassin continental de 4 677 000 km², et l'altitude du zéro de l'échelle limnimétrique serait de l'ordre de 2–3 m. L'influence de la marée océanique n'y est plus très importante: 10 cm tout au plus en étiage. Cette amplitude n'entraîne qu'un écart en débit de ±2%, valeur que l'on peut considérer comme négligeable.

L'étude actuelle traite de l'évolution de ces débits, en parallèle avec celle de la pluviométrie et de la déforestation.

EVOLUTION DES DEBITS DE L'AMAZONE A ÓBIDOS: 1903–1999

Généralités

Le lissage des échantillons a été effectué en utilisant une distribution polynomiale d'ordre 4 sur les valeurs annuelles, plutôt que de calculer des moyennes mobiles sur cinq ans. Les résultats sont d'ailleurs identiques. L'ordre 4 s'est révélé être le mieux adapté, l'augmentation de la valeur du coefficient de détermination r^2 n'étant pas significative entre l'ordre 2 et l'ordre 6.

En plus du lissage, des tests de tendance, autocorrélation et rupture (Kendall & Stuart, 1943; Lee & Heghinian, 1977; Pettitt, 1979; Spearman: dans Siegel & Castellan, 1988; Hubert *et al.*, 1989) ont été pratiqués. Le test de Spearman a été effectué avec la version la plus ordinaire et seul l'ordre 1 a été calculé.

Les tests d'autocorrélation utilisés indiquent que les trois séries (modules, crues, étiages) sont aléatoires, bien que Marengo (1999) ait signalé un cycle pluridécennal autour de 20 ans pouvant correspondre à la variabilité des températures de surface de l'Atlantique Sud.

La Fig. 2 représente les valeurs des débits depuis 1903 et les courbes polynomiales de la tendance, tandis que le Tableau 1 regroupe les tendances et les cassures.

Evolution des modules

La courbe de tendance signale une nette augmentation des modules de 1903 à 1922, une stabilisation de 1922 à 1945 suivie d'une nouvelle augmentation jusqu'en 1988 et finalement une tendance à la diminution (Tableau 1), en corrélation avec la décroissance de la pluviométrie (voir Fig. 4). Remarquons que cette diminution de la pluviométrie correspondrait assez bien à une tendance à l'augmentation des pluies du Sahel africain (Ozer *et al.*, 2003).

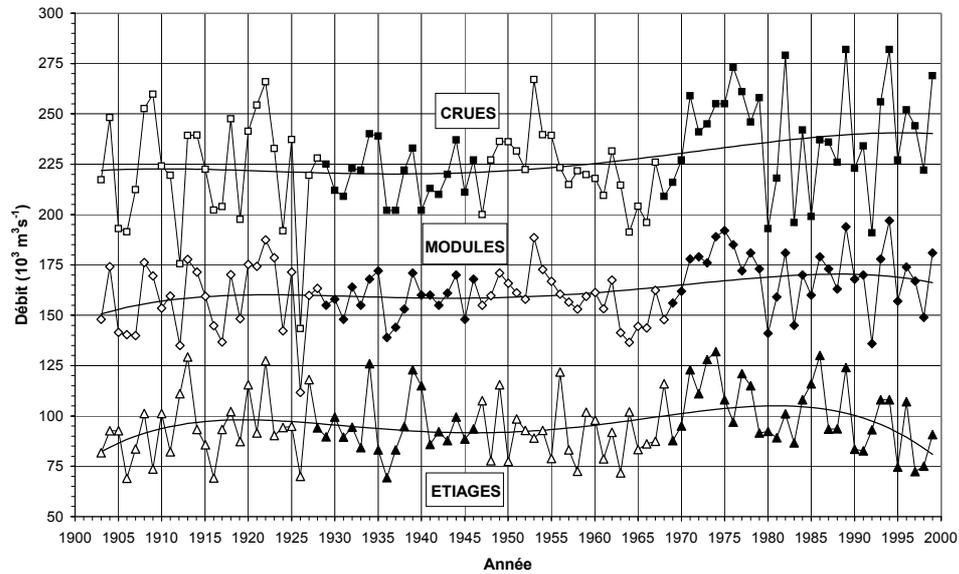


Fig. 2 Evolution des débits à Óbidos depuis 1903. Les symboles avec un fond noir correspondent aux valeurs observées. Ceux avec un fond blanc correspondent aux valeurs reconstituées.

Tableau 1 Tendances et ruptures sur les débits. Le signe + (–) indique une tendance à la croissance (décroissance). Le signe = indique une stabilité des valeurs. La croix (×) indique l'année de rupture s'il y a lieu.

Année	1910	1930	1950	1970	1990
<i>Modules</i>					
Tendance	+	=		+	–
Pettitt				×	
Lee & Heghinian				×	
Hubert				×	
<i>Crues</i>					
Tendance		=		+	
Pettitt				×	
Lee & Heghinian				×	
Hubert				×	
<i>Etiages</i>					
Tendance	+	–		+	–

Les tests de rupture indiquent tous une cassure en 1969/1970, les débits augmentant après cette date. Cette cassure est également observée en d'autres lieux d'Amérique du Sud. Par exemple Genta *et al.* (1998), en utilisant les séries de débit presque centenaires (1901–1995) des rios Uruguay, Negro, Parana et Paraguay, trouvent après 1970 des débits médians supérieurs à ceux qui précèdent. Citons aussi Müller *et al.* (1998), Cutim *et al.* (2000) et Collischonn *et al.* (2001). La rupture se retrouve aussi sur les fleuves d'Afrique comme le Congo à Brazzaville (Laraque *et al.*, 2001), l'Oubangui à Bangui ou le Sénégal à Bakel (travaux personnels de J. Callède) mais en sens inverse, les débits diminuant à partir de 1970. Par contre, il n'y a pas de rupture sur l'Ogoué à Lambaréné (Gabon) ni sur la Cuyuni à Kamaria Falls (Guyana). En Afrique, cette rupture de 1970 se retrouve sur la pluviométrie annuelle au Sahel

(L'Hôte *et al.*, 2003) dont la diminution a causé une sévère sécheresse. Jusqu'à présent, la cause exacte de cette cassure—à l'échelle de deux continents—n'a pas encore été élucidée.

Le calcul du R de Spearman et du τ de Kendall décèle une relation positive entre les modules et le temps, indiquant une augmentation des modules sur la période étudiée. L'augmentation générale des modules, de 1903 à 1999, est de 9%.

Evolution des crues

“Or, depuis une quarantaine d'années (1895) l'on a pu noter des modifications très importantes au régime, qui paraissait si régulier, de ces crues...” Le Cointe (1935).

Dans cette même note, Le Cointe signale (sans indiquer malheureusement le lieu d'observation) une crue mémorable en 1859, puis celles de 1892, 1895, 1901, 1904, 1908 et 1909, 1918, 1921, 1922, 1931 et 1934. A part celle de 1931, ces crues se retrouvent assez bien sur la Fig. 2.

A partir de 7.6 m à l'échelle limnimétrique d'Óbidos, l'Amazone commence à déborder dans les rues commerçantes proches du port. Cette hauteur correspond à un débit d'environ $250\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$. La Fig. 2 montre nettement que cette hauteur a été atteinte ou dépassée douze fois de 1970 à 1999 et seulement cinq fois de 1903 à 1969: il y a donc eu aggravation du nombre des très fortes crues depuis 1969. La courbe de tendance est un peu différente de celle des modules. Jusque vers 1940, la tendance est à la stabilité. Mais à partir de 1940 la tendance est à la croissance. L'augmentation générale des débits des crues, significative sur la période 1903–1999, est de 10%. Les tests de rupture indiquent également une cassure en 1969/1970.

La corrélation entre modules et crues est très bonne. Le coefficient de corrélation linéaire, r , est égal à 0.923.

Evolution des étiages

Pour le commun des mortels, seules les crues, de par leur côté spectaculaire et souvent dévastateur, sont dignes d'intérêt. Mais les étiages sont importants pour la navigation fluviale et à ce titre intéressent les hydrologues (Steinberg, 1987).

L'évolution de la courbe de tendance est intéressante: elle ressemble beaucoup à celle des modules, à la différence près que la tendance à la baisse, depuis 1981, est bien plus nettement accentuée. De ce fait, la corrélation entre modules et étiages n'est pas très serrée ($r = 0.504$). L'évolution générale des étiages, de 1903 à 1999, est à la stabilité.

Les tests de Pettitt et de Hubert déclarent la série sans rupture. Celui de Lee & Heghinian indiquerait une rupture en 1967 mais avec une densité de probabilité trop faible (0.0628) pour être réellement significative.

Le R de Spearman et le τ de Kendall ne sont pas significatifs et montrent donc qu'il n'y pas d'évolution des étiages sur la période 1903–1999 du fait de leur forte baisse récente, qui les ramènent à leur niveau du début du siècle.

Evolution des coefficients de variation

La Fig. 2 indique assez nettement que, durant la période 1927/1970, la variation des débits des modules et des crues d'une année à l'autre est plus faible que durant les périodes 1903/1926 et 1971/1999. Un test de Fisher indique une probabilité pratiquement nulle pour que les variances de ces trois périodes soient identiques. L'évolution des coefficients de variation (écart-type / moyenne), de dix en dix années, confirme le resserrement des débits des modules et des crues entre 1927 et 1970 (Tableau 2).

Tableau 2 Evolution du coefficient de variation, de 1903 à 1999.

Décennie	03/10	11/20	21/30	31/40	41/50	51/60	61/70	71/80	81/90	90/99
Modules	0.09	0.10	0.13	0.07	0.04	0.06	0.06	0.08	0.08	0.10
Crues	0.11	0.10	0.15	0.07	0.06	0.06	0.06	0.08	0.12	0.11
Etiages	0.13	0.17	0.15	0.19	0.12	0.14	0.13	0.12	0.15	0.16

INFLUENCE DE LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE DU BASSIN AMAZONIEN SUR LES DEBITS A ÓBIDOS

Les données pluviométriques proviennent du fichier pluviométrique de l'ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica, anciennement DNAEE), des fichiers des Services Météorologiques nationaux et du fichier mondial de la NOAA/GHCN (Wotling & Mahé, 1994).

La pluie étant “élément moteur” de l'écoulement, il paraît logique que toute modification de la pluviométrie entraînera *ipso facto* une modification des débits.

Une première approche consiste à comparer la série hydrologique aux postes pluviométriques de longue durée existant sur le bassin (six au total). Mais il n'est pas cohérent de comparer le débit moyen annuel de l'Amazone à Óbidos, représentatif de la somme des myriades de débits moyens annuels des tributaires du fleuve, à ces six malheureux échantillons ponctuels de la pluviométrie annuelle répartis sur un bassin de 4.7 millions de km²! Les résultats sont assez décevants, sinon contradictoires.

Par contre la comparaison, année par année, des débits avec la pluviométrie annuelle moyenne recueillie sur l'ensemble du bassin est bien plus logique. Elle rapproche cette intégration du débit des tributaires à celle obtenue par la moyenne pondérée de plusieurs dizaines de pluviométries annuelles bien réparties sur le bassin. Malheureusement, la période de référence ne peut commencer qu'en novembre 1944 (année hydrologique 1944/1945) et doit se terminer en octobre 1998, faute de données pluviométriques suffisantes. Elle n'est plus que de 53 ans.

La détermination de la pluviométrie annuelle suit la même logique que celle utilisée pour le calcul du bilan hydrologique à Óbidos (Callède *et al.*, 2002). Quarante-trois postes pluviométriques sont utilisés: (a) 28 sont situés au Brésil, (b) quatre au Pérou, (c) quatre en Bolivie, (d) un en Colombie, (e) trois en Equateur, (f) deux au Venezuela et (g) un au Surinam. La Fig. 3 indique l'emplacement des postes et la valeur moyenne observée durant la période 1945–1998.

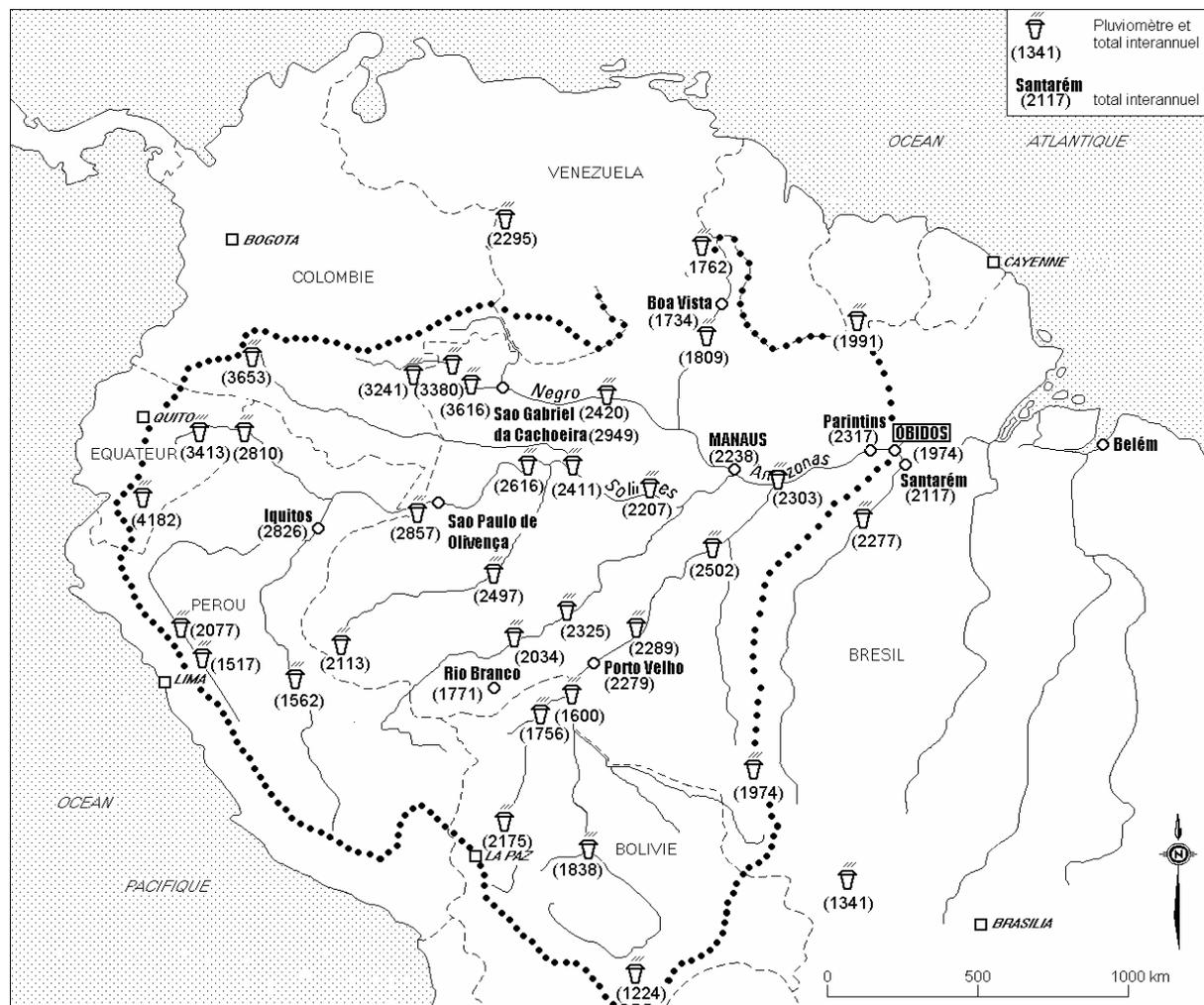


Fig. 3 Les 43 postes pluviométriques du bassin de l'Amazone à Óbidos. Les valeurs entre parenthèses indiquent la pluviométrie interannuelle (année hydrologique commençant au 01 novembre) pour la période 1944/45–1997/98.

Tableau 3 Tendence sur les pluviométries moyennes annuelles. Le signe + (–) indique une tendance à la croissance (décroissance). Le signe = indique une stabilité des valeurs.

Année	1945	1955	1965	1975	1985	1995
Tendance		–		+		–

L'homogénéité des valeurs annuelles a été vérifiée par la méthode du vecteur régional (Brunet-Moret, 1979; L'Hôte, 1986). La pluviométrie moyenne annuelle est déterminée par la méthode éprouvée des polygones de Thiessen (Thiessen, 1911).

L'analyse de la tendance et des ruptures sur l'échantillon de pluviométries moyennes est donnée par le Tableau 3.

La courbe de tendance (polynomiale d'ordre 4) indique une baisse jusqu'en 1957, une augmentation de 1958 à 1981 et une nouvelle baisse ensuite. Mais la tendance générale est à la stabilité (Fig. 4).

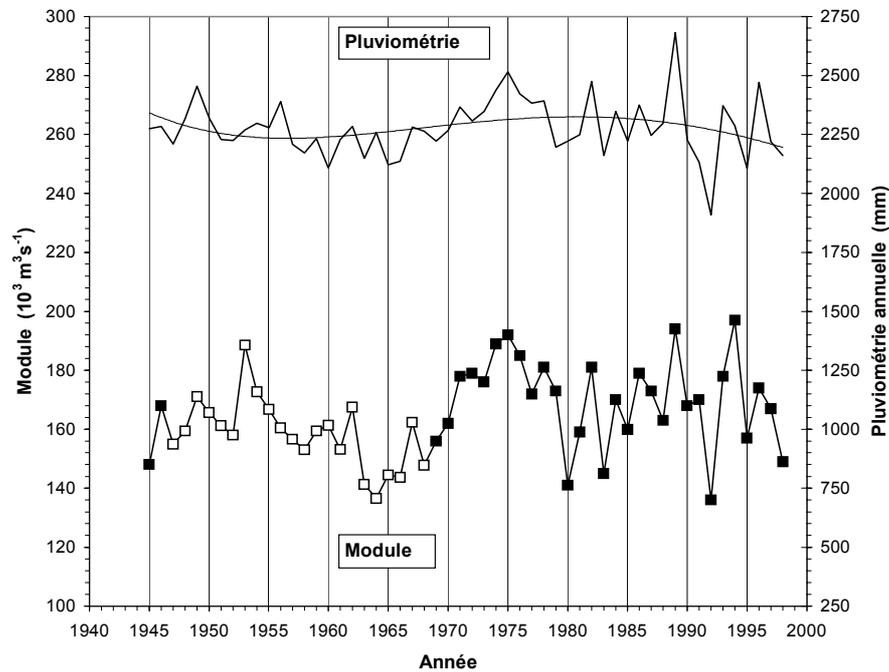


Fig. 4 Evolution, de 1945 à 1998, des modules ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) de l'Amazone à Óbidos et de la pluviométrie moyenne annuelle (mm) sur le bassin. Les symboles avec un fond noir correspondent aux valeurs observées. Ceux avec un fond blanc correspondent aux valeurs reconstituées.

Curieusement, l'analyse de pluies annuelles moyennes ne décèle aucune rupture ni aucune autocorrélation.

Sur la période 1945–1988, tout comme pour 1903–1999, la tendance générale des modules et des crues est à la hausse tandis que celle des étiages est à la stabilité. La Fig. 4 met en parallèle la pluviométrie moyenne annuelle et les modules. Cette figure indique des pics et des creux simultanés dans la plupart des cas: il y a ainsi une excellente covariation entre pluie et débit. Ceci se retrouve également, tout aussi nettement, avec les crues et les étiages. Ainsi chaque augmentation (resp. diminution) de la pluviométrie se traduira généralement par une augmentation (resp. diminution) des modules, crues et étiages.

Les coefficients de corrélation linéaires entre pluie et débit (Fig. 5) sont largement significatifs pour un risque d'erreur de 5%. Ils sont de 0.715 pour les modules, 0.689 pour les crues et 0.607 pour les étiages. Le test de Fischer est, lui aussi, bien significatif: F de Fischer vaut 63.3 pour les modules, 45.6 pour les crues et 32.8 pour les étiages, valeurs très supérieures au F-seuil pour un risque d'erreur de 5%, en l'occurrence 4.08.

Mais il ne faut pas minimiser, pour autant, la dispersion entre la droite de régression et les couples pluie débit. Cette dispersion est occasionnée par de multiples facteurs dont (a) le nombre insuffisant de postes pluviométriques (bien que toutes les stations synoptiques de la "selva" aient été utilisées), (b) une répartition de la pluie inégale d'une année à l'autre, (c) de ce fait, un degré de saturation du sol également inégal, et (d) un synchronisme différent, d'une année à l'autre, dans l'arrivée des apports en débit à Óbidos.

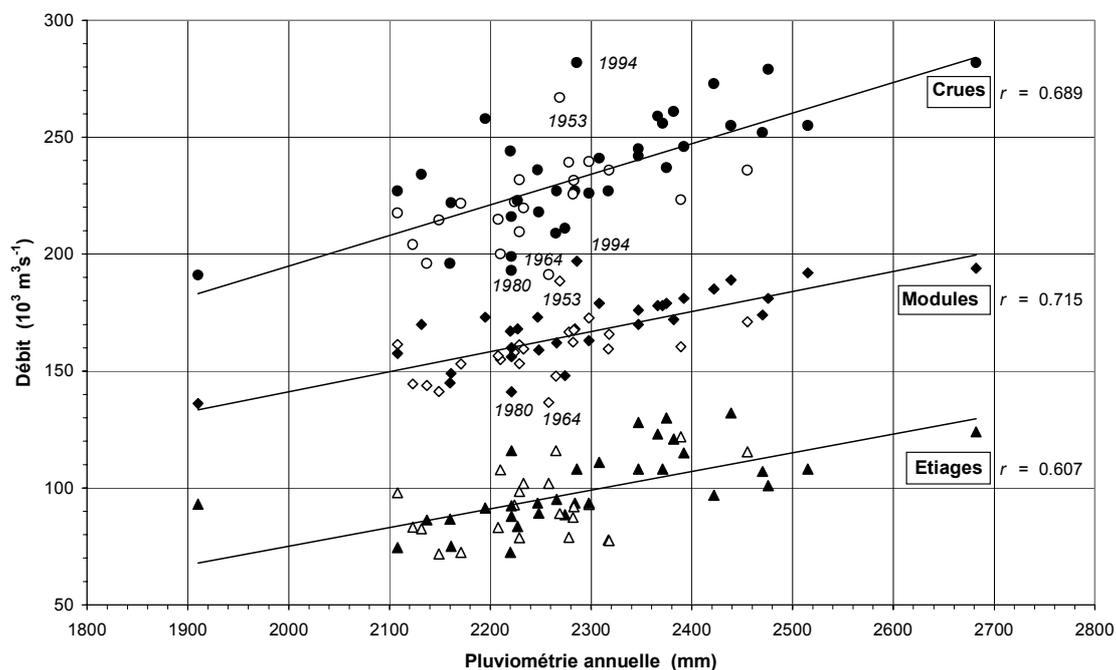


Fig. 5 Relations pluie-débit à Óbidos. Les symboles avec un fond noir correspondent aux valeurs observées. Ceux avec un fond blanc correspondent aux valeurs reconstituées.

La Fig. 5 indique, par exemple, que les modules et les crues des années 1953 et 1994 sont bien supérieurs à ce que laissent supposer les pluviométries moyennes annuelles. À l'inverse, 1964 et 1980 sont faibles par rapport à cette pluviométrie.

INFLUENCE DE LA DEFORESTATION

La déforestation de la forêt amazonienne était négligeable jusqu'en 1960 et n'a réellement commencé que vers 1976. La superficie totale était de 7 645 000 km² dont 4 129 000 km² pour le bassin versant de l'Amazonie à Óbidos (4 677 000 km²).

En 1997, la superficie déforestée sur le bassin amazonien (Fearnside, 1990; Kalmowitz, 1997; Laurance, 1998) était de 546 000 km² (la superficie de la France!), ce qui représente 14% de la superficie du bassin d'Óbidos.

En Amazonie, déboisement n'est pas synonyme de désertification (comme en Afrique sahélienne et dans l'archipel du Cap-Vert) puisque la pluviométrie y est très largement supérieure à l'évapotranspiration potentielle (ETP). La zone déforestée est, dès la tombée de la première pluie, aussitôt couverte par un tapis herbacé qui freinera l'écoulement.

Ces années qui suivent la déforestation ont été étudiées par Fritsch (1992) sur les bassins expérimentaux du Projet ECEREX (ECoulement, ERosion, EXpérimentation) sous forêt dense en Guyane française (voir l'emplacement, Fig. 1). Ses conclusions indiquent que si la parcelle déboisée est laissée telle quelle, la forêt reprend ses droits de trois à six ans après la coupe. Mais en cas de remplacement définitif de la forêt par du pâturage (ce qui est le cas, à plus de 90%, sur le bassin amazonien brésilien),

l'écoulement restera, principalement par disparition de la canopée, définitivement supérieur d'environ 30% à ce qu'il était sous forêt. Cette valeur est strictement indicative à cause de l'effet d'échelle entre les parcelles expérimentales de quelques km² et l'immense bassin amazonien.

Au point de vue strictement hydrologique, la déforestation (Fränzle, 1979; Sioli, 1989; Shukla *et al.*, 1990; Fritsch, 1992; Laurance, 1998) entraînerait:

- une augmentation des écoulements par disparition de l'interception de la pluie par la voûte forestière. Cette interception a été évaluée à 19.8% par Franken *et al.* (1982).
- une augmentation des écoulements par diminution de la percolation de l'eau dans le sol et par augmentation du ruissellement superficiel, qui n'est plus freiné par la végétation. Ceci occasionnera des crues plus brutales, avec une augmentation des débits de pointe.
- des étiages plus sévères car les réserves en eau du sol ont diminué.

La mise en évidence du rôle de la déforestation utilise les courbes de tendance de la pluie et des débits pour la période 1945–1998. Afin de discerner l'influence réciproque de chaque paramètre (Béguin, 1979), leurs valeurs annuelles ont été transformées en "valeurs centrées et réduites par rapport à la moyenne" préalablement ramenées à la même échelle et à la même unité. Si T_a est la valeur annuelle de la tendance du paramètre et P_{moy} sa valeur moyenne, la "valeur centrée réduite par rapport à la moyenne" est égale à:

$$T_r = (T_a - P_{\text{moy}})/P_{\text{moy}} \quad (1)$$

nombre sans dimension prenant la valeur 0 quand $T_a = P_{\text{moy}}$, que l'on peut exprimer en pourcentage de P_{moy} , c'est à dire:

$$K_{\%} = 100T_r \quad (2)$$

La représentation des quatre courbes de tendance ainsi transformées est donnée sur Fig. 6.

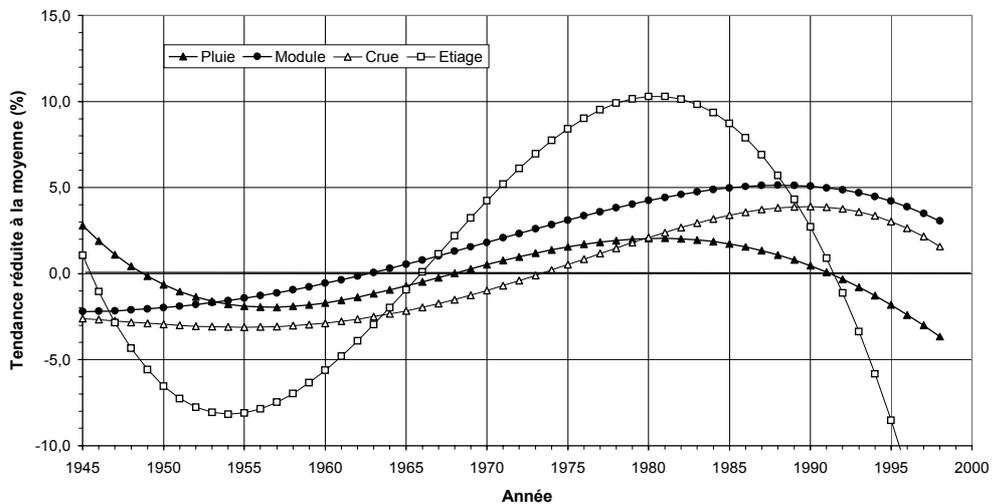


Fig. 6 Evolution des courbes de tendance centrées réduites à la moyenne, exprimées en % de la moyenne.

De 1963 à 1973, les tendances réduites de la pluie et du module croissent avec un gradient assez constant (1.3%). La tendance de la pluie passe par un maximum (2% en 1981) puis décroît à -3.7% en 1998. L'évolution de la tendance réduite du module suit la même forme: maximum de 5.1% en 1988 et décroissance à 3.1% en 1998. De ce fait, l'écart pluie module augmente progressivement à partir de 1974 (1.5%) et atteint 6.8% en 1998.

L'évolution des crues est assez semblable à celle des modules. Celle des étiages est très marquée mais avec une évolution identique à celle de la pluie.

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'évolution des modules et des crues, depuis bientôt 100 ans, montre une légère tendance générale à l'augmentation (depuis 1903, $155 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ par an pour les modules et $186 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour les crues). Les étiages à Óbidos sont stables sur l'ensemble de la période étudiée mais ils présentent une allure cyclique avec une baisse importante depuis la fin des années 1980.

Les modules et les crues montrent une cassure, suivie d'une augmentation des débits, se situant vers 1970, cassure que l'on rencontre assez souvent sur les fleuves d'Amérique du Sud et, en sens inverse, sur quelques fleuves africains.

L'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne du bassin (effectuée de 1945 à 1998, en utilisant 43 stations synoptiques) est intéressante. Elle indique que chaque variation annuelle de la pluviométrie se répercute, généralement dans le même sens, tant sur les débits moyens annuels, que sur les crues et les étiages. Entre pluie et débit, les coefficients de corrélation linéaire et les tests de Fischer sont tous significatifs pour indiquer qu'il y a corrélation. Mais la relation entre pluies et débits n'est pas parfaite à cause de multiples facteurs dont l'imprécision dans la détermination de la pluviométrie annuelle moyenne (nombre insuffisant de postes pluviométriques), une répartition de la pluie inégale d'une année à l'autre, un degré de saturation du sol lui aussi inégal et une arrivée à Óbidos, différente d'une année à l'autre, des débits des principaux tributaires.

La superposition des courbes de tendance (pluie et module), ramenées en tendance centrée réduite à la moyenne, laisserait apparaître une influence de la déforestation à partir de 1974, où l'écart, assez constant depuis 1963 (1.3%) entre ces courbes, augmente régulièrement: 2.2% en 1980, 3.3% en 1985, 4.6% en 1990, 6% en 1995 et 6.8% en 1998. En 1997, année de la dernière évaluation de l'importance de la déforestation, cet écart entre module et pluviométrie est de 5.2% (déduction faite de l'écart 1963-1973, soit 1.3%). Ces 5.2% pourraient correspondre aux conséquences de la déforestation de 14% du bassin amazonien. Ceci voudrait dire que, sur cette zone déforestée (14% du bassin), le coefficient d'écoulement aurait augmenté de 37% puisque sur le reste du bassin (86%) les conditions d'écoulement sont restées les mêmes. Ce chiffre est à rapprocher des 30 % indiqués par Fritsch (1992) et rappelés ci-dessus. Il apparaît que, depuis 1990, l'augmentation annuelle de l'écart module pluie, tout en étant positive, se ralentit.

La déforestation pourrait être mise en cause pour les douze crues importantes ayant entraîné une inondation dans la basse ville d'Óbidos, de 1976 à 1999, dont celle de 1989 qui est encore la plus importante jamais observée depuis 1903. Mais cette crue de

1989 est liée à une pluviométrie moyenne exceptionnellement forte sur l'ensemble du bassin.

Il est assez difficile d'affirmer que l'aggravation des étiages est due à la déforestation. La Fig. 2 montre que de 1903 à 1975 (73 années) les étiages sévères, inférieurs à $75\,000\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, ont été observés sept fois et trois fois seulement entre 1976 et 1999 (24 années). Cette même figure indique que, de 1965 à 1989, les étiages ont été très soutenus bien que la déforestation intense commence durant la décennie 1970.

Il est également possible qu'à partir de 1980 les décalages entre pluie, module et crue, soient simplement occasionnés par une hystérèse entre les courbes.

Les paramètres mis en jeu ne variant que de quelques pour cents, il n'est pas possible, pour l'instant, de se prononcer définitivement sur la validité de l'influence de la déforestation. Il faudra reprendre les analyses de tendance vers 2005 en y incluant les données des années récentes. Il sera important de connaître, à cette date, la superficie des zones déforestées depuis 1976 et ce que sont devenues ces zones (pâturages, retour à la forêt, etc.), ce qui est aujourd'hui possible avec les techniques de télédétection.

REFERENCES

- Béguin, H. (1979) *Méthode d'analyse géographique quantitative*. Litec Droit, Paris, France.
- Brunet-Moret, Y. (1979) Homogénéisation des précipitations. In: *Cah. ORSTOM, sér. Hydro.* **XVI**(3–4), 147–170.
- Callède, J., Kosuth, P. & de Oliveira, E. (2001) Etablissement de la relation hauteur-débit de l'Amazone 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. & de Oliveira, E. (2002) L'Amazone à Óbidos (Brésil): étude statistique des débits et bilan hydrologique. *Hydrol. Sci. J.* **47**(2), 321–333.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M. & Clarke, R. T. (2001) Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *J. Hydrol.* **245**, 218–238.
- Fearnside, P. M. (1990) The rate and extent of deforestation in Brazilian Amazonia. *Environ. Conserv.* **17**(3), 213–226.
- Franken, W., Leopoldo, P. R., Matsui, E. & Ribeiro, M. N. G. (1982) Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme (Etude de l'interception de l'eau de pluie par le couvert forestier amazonien de type "terra firme"). *Acta Amazônica* Manaus (Brésil) **12**, 327–331.
- Fränzle, O. (1979) The water balance of the tropical rain forest of Amazonia and the effect of human impact. *Appl. Sci.* **7**, 88–117.
- Fritsch, J. M. (1992) Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. Thèse, Collection Etudes et Thèses, Orstom, Paris, France.
- Genta, J., Perez-Iribarren, G. & Mechosos, C. (1998) A recent increasing trend in streamflow of rivers in southeastern South America. *J. Climate* **11**, 2858–2862.
- Hubert, P., Carbonnel, J.-P. & Chaouche, A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* **110**, 349–367.
- Kalmowitz, D. (1997) Factors determining low deforestation: the Bolivian Amazon. *Ambio* **26**(8), 537–540.
- Kendall, S. M. & Stuart, A. (1943) *The Advanced Theory of Statistic* (édition 1977), vols 2 & 3. Charles Griffin, London, UK.
- Laraque, A., Mahé G., Orande D. & Marieu B. (2001) Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *J. Hydrol.* **245**(1–4), 104–117.
- Laurance, W. F. (1998) A crisis in the making: responses of Amazonian forests to land use and climate change. *Tree* **13**, 411–415.
- Le Coite, P. (1935) Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime. *Annales de Géogr.* **44**, 614–619.
- Lee, A. F. S. & Heghinian, S. M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables—a Bayesian approach. *Technometrics* **19**(4), 503–506.
- 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. Deuxièmes Journées Hydrologiques de l'Orstom à Montpellier (16–17 septembre 1986). In: *Collection Colloques et Séminaires de l'Orstom*, 37–52. Orstom, Paris, France.
- L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J.-P. (2003) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.* **47**(4), 563–572.
- Marengo, J. A. (1999) Interdecadal and long-term variability of the hydrometeorology of the Brazilian Amazon basin. In: *Hydrological and Geochemical Process in Large-scale River Basins* (Proc. Manaus Symp., November 1999). CD, IRD, Brasília, Brésil.

- Müller, I. I., Krüger, C. M. & Kaviski, E. (1998) Análise de estacionaridade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu (Analyse de la stationnarité des séries hydrologiques dans le bassin développé d'Itaipu). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* **3**(4), 51–71.
- Oltman, R. E. (1968) Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon River. *US Geol. Survey Circular* 552. Washington, USA.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G. & Vandiepenbeeck, M. (2003) Discussion of “Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues”. *Hydrol. Sci. J.* **48**(3), 489–492.
- Pardé, M. (1965) Sur les débits monstrueux de l'Amazone. *Annales de Géogr.* **401**, 113–114.
- Pettitt, A. N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* **28**(2), 126–135.
- Shukla, J., Nobre, C. A. & Sellers, P. (1990) Amazonia deforestation and climate change. *Science* **247**, 1322–1325.
- Sioli, H. (1989) Introdução ao Simpósio “Amazônia: desflorestamento e possíveis efeitos” (Introduction au Symposium “Amazonie: déforestation et effets possibles”). *Interciencia* **14**(6), 286–290.
- Siegel, S. & Castellan, N. J. (1988) *Non-parametric Statistics for the Behavioural Sciences*. McGraw-Hill, New York USA.
- Steinberg, H. O'R. (1987) Aggravation of floods in the Amazon river as consequence of deforestation? *Geografiska Annaler* **69A**, 201–219.
- Thiessen, A. H. (1911) Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Rev.* **39**, 1082–1084.
- Wotling, G. & Mahé, G. (1994) Les données pluviométriques mondiales du Fichier GHCN. *La Gazette* 29, Laboratoire d'Hydrologie, Orstom, Montpellier, France.

Reçu le 3 février 2003; accepté le 7 novembre 2003

