

Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazone...

Résumé

Après une première étude sur les variations saisonnières de l'Amazone, Maurice Pardé proposait en 1954 à la communauté hydrologique la valeur de 100000 à 110000 m³/s comme module de ce fleuve géant qui draine un bassin de plus de 6000000 km². Ce résultat, que certains jugeaient alors excessif, était basé sur les observations de son compatriote Paul Le Cointe, et sur le calcul d'un bilan hydrique rudimentaire, du fait du très petit nombre de données hydroclimatiques disponibles à cette époque. Après les premiers jaugeages de l'Amazone à Obidos par l'USGS en 1963-64, le module du plus puissant fleuve du monde était alors estimé à 170000-190000 m³/s, attestant ainsi que la première estimation de Pardé n'était absolument pas surestimée... Les résultats obtenus dans le cadre du programme HIBAM (Hidrologia da Bacia Amazônica, DNAEE/CNPq - ORSTOM) ont permis de préciser le régime de l'Amazone et de ses principaux tributaires. Les apports des différents sous-bassins et le module de l'Amazone à son embouchure ont pu être estimés avec une assez bonne précision, ce qui a rendu possible la régionalisation des débits annuels.

Mots-clés : Brésil, Amazone, débit moyen annuel, régime hydrologique

Abstract

After a first study about seasonal variations of the Amazon river, Maurice Pardé (1954) proposed to hydrologic community, the value of 100000 to 110000 m³/s as the mean discharge of that giant river who drains a basin of more than 6000000 km². This result, which someone thought excessive, was founded according Paul LeCointe observations and from a rudimentary water budget calculation, because of the few available hydroclimatic data of this time. After the first USGS gauging of the Amazon river at Obidos in 1963-64, the mean discharge of the strongest river of the world, was valued at 170000-190000 m³/s, showing that the first Pardé value was not overestimated.

With the HIBAM program (Hidrologia da Bacia Amazônica, DNAEE/CNPq-ORSTOM), the results allowed to specify the regime of the Amazon river and his main tributaries. The yields of the different tributaries drainage basin, and the Amazon mean discharge at his mouth, were estimated with a quite good precision, which made possible the regionalisation of the discharge.

1. Introduction

Les premières estimations du débit de l'Amazone datent du siècle dernier (Spix & Marius, 1831 ; Reclus, 1877 ; Siemens, 1896 ; Katzer, 1898 *In* Oltman & al., 1964). Ces résultats, qui correspondent le plus souvent à des mesures ponctuelles, étaient basés sur l'estimation de la vitesse moyenne du courant et de la section du fleuve. Maurice Pardé estime ensuite le débit de l'Amazone (environ 100000 m³/s) à partir des observations de P. Le Cointe et du calcul d'un bilan hydrique rudimentaire (Le Cointe, 1935 ; Pardé, 1936, 1954). Les premiers jaugeages de

l'Amazone, réalisés en 1963-1964 par l'US Geological Survey, permettent enfin d'avoir une idée correcte du débit de l'Amazone à la station de référence de Obidos qui draine un bassin de 4620000 km² (figure 1). Les apports de ce fleuve à l'océan Atlantique oscilleront suivant les auteurs et les périodes considérées, de 175000 à 212000 m³/s (Davis, 1964 ; Oltman & al., 1968 ; Nordin & Meade, 1985 ; Richey & al., 1986, 1989) (figure 2).

Le calcul du débit de l'Amazone, mais aussi celui de ses principaux tributaires, est compliqué par la très faible pente du cours d'eau, qui ne dépasse pas

Jean Loup GUYOT &
Michel MOLINIER
ORSTOM Brasilia DF
Brésil
Valdemar GUIMARAES,
Kazimierz CUDO &
Eurides de OLIVEIRA
DNAEE-CGRH Brasilia DF
Brésil

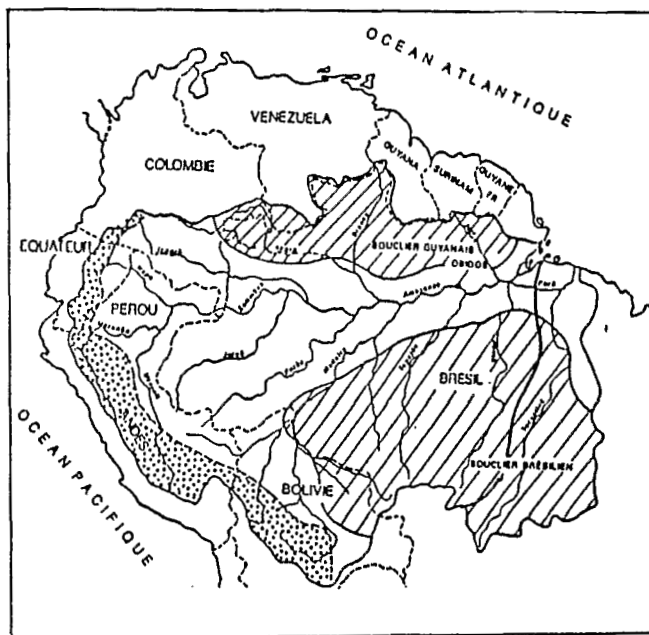


Figure 1 : Bassin de l'Amazone

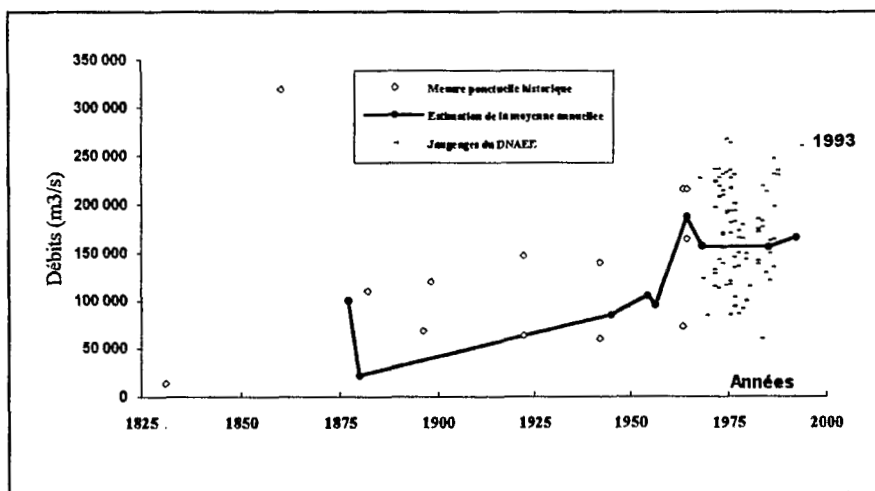


Figure 2 : Evolution de l'estimation des débits à Obidos

2 cm/km et les fortes vitesses observées. Il ne s'agit pas d'un écoulement classique d'amont vers l'aval, mais d'une poussée par l'onde de crue des fleuves d'origine andine. Aussi, les relations hauteurs-débits ne sont jamais univoques, et présentent des courbes en forme de lasso qui sont une fonction du gradient hydraulique. Pour cette raison, les apports de certains tributaires importants, comme le Rio Negro, sont souvent très mal connus.

Le programme HIBAM (Hidrologia da Bacia

Amazônica : DNAEE*/CNPq** - ORSTOM) a commencé en 1982. Son but est d'effectuer une étude assez complète de l'hydrologie du bassin amazonien, en focalisant ses recherches sur la réalisation de jaugeages précis par exploration complète du champ des vitesses dans la section de quelques stations clés, l'établissement de courbes de tarage tenant compte du gradient limnimétrique, la critique et l'homogénéisation des données hydroclimatiques du DNAEE permettant le calcul de bilans hydriques précis par sous-bassins et la télétransmission satellitaire de données hydrologiques.

* DNAEE : Département National de l'Eau et de l'Energie Electrique

** CNPq : Conseil National du Développement Scientifique et Technologique

Un des objectifs du programme HIBAM est la connaissance des débits des différents affluents de l'Amazone et de l'Amazone lui-même, de leur variation saisonnière, ainsi qu'une meilleure estimation des principaux termes du bilan hydrologique de surface et des apports hydriques à l'océan Atlantique.

2. Le bassin amazonien

Le bassin de l'Amazone, le plus important des fleuves de la planète en terme de surface drainée et de débit, couvre 6112000 km² (près de 5 % des terres émergées) et apporte à l'Atlantique un volume d'eau qui représente environ de 15 à 20 % des apports hydriques aux océans.

Ce bassin, situé entre 5° de latitude Nord et 20° de latitude Sud, est divisé en trois grandes unités morphostructurales héritées de son histoire géologique : les boucliers, la chaîne des Andes et la plaine amazonienne, qui occupent respectivement 44 %, 11 % et 45 % de la superficie totale du bassin versant (figure 1). Les principaux fleuves formateurs de l'Amazone présentent des caractéristiques hydrographiques liées à ces trois grandes unités. Les deux fleuves d'origine andine (Rio Marañon - Solimoes et Rio Madeira) signent leurs apports à l'Amazone par des eaux chargées en matières dissoutes et particulaires.

Dans la région de Manaus, la convergence des apports des rios Solimoes, Negro et Madeira entraîne une nette augmentation des surfaces drainées et des débits. Cette concentration des apports, associée à une très faible pente hydraulique, va générer des perturbations dans l'écoulement de ces fleuves, aggravant la non-univocité des courbes de tarage dans cette région.

3. Régimes

Le « Rio Amazonas » se forme au Pérou avec la rencontre des rivières andines Ucayali et Marallon et, un peu plus en aval, du Napo qui vient de l'Equateur. En entrant au Brésil ce fleuve change de nom pour prendre celui de Solimoes. Il ne retrouvera ce nom d'Amazone qu'après avoir reçu, au Brésil, les eaux du Rio Negro. A la frontière Pérou-Brésil, à Tabatinga, il lui reste encore près de 3000 km à parcourir et son débit est déjà de 46000 m³/s, c'est-à-dire l'équivalent de celui du Congo (deuxième fleuve du monde) à son embouchure. Cependant, malgré cette distance, avant

de rencontrer les eaux de l'Atlantique, il ne lui reste plus que 60 mètres à descendre, ce qui explique la particularité de la propagation de l'onde de crue, comme indiqué précédemment. Sur cette distance, son volume va être multiplié par 4,5 pour déverser, en moyenne, près de 6600 milliards de m³ par an à l'océan Atlantique, soit 209000 m³/s

Cette grande quantité d'eau est le résultat de plusieurs facteurs, le principal étant, bien sûr, l'immense superficie de son bassin versant. Cependant son alimentation très diversifiée joue aussi un très grand rôle. En effet, ce bassin, à cheval sur l'équateur, est situé dans une des zones les plus pluvieuses du monde, 2460 mm en moyenne pour l'ensemble du bassin (Salati & al., 1978 ; Nimer, 1979 ; Molinier & al., 1992).

Tout au long de ce parcours brésilien les apports se répartissent à peu près à égalité entre les affluents de rive gauche et de rive droite (respectivement 46 % et 54 %). Le régime saisonnier évolue au fur et à mesure de son cours en fonction de ces apports. On peut distinguer, tout d'abord, deux grandes catégories d'apports correspondant à l'origine rive gauche ou rive droite des affluents. Les apports de rive gauche proviennent d'une région, en moyenne, plus pluvieuse avec un maximum de pluviométrie centrée sur les mois de mai à juillet, ce qui explique que le débit spécifique moyen de ces affluents soit en général plus élevé. Par contre les affluents de rive droite qui viennent du sud du bassin, moins arrosés et où les mois de plus forte pluviosité sont les mois de janvier à mars, ont une hydraulité plus faible ; le mois le plus abondant est celui de mars, avril ou mai. Il y a cependant une exception. En effet, les affluents de rive gauche descendant du bouclier guyanais ont un débit spécifique comparable aux affluents de rive droite (figure 3). Ceci est dû principalement à une pluviométrie inférieure, surtout pour les bassins du Rio Branco (moyenne pluviométrique de 1650 mm) et du Rio Trombetas (moyenne pluviométrique de 1800 mm).

Le maximum mensuel moyen des affluents de rive droite a toujours lieu avant le mois de juin, alors que celui de rive droite se situe invariablement après ce mois de juin. Pour le Solimoes/Amazone, le mois le plus abondant est, en général, ce mois de juin.

4. Les crues de l'Amazone

La plus forte côte à Obidos a été observée en juin 1989. Elle était de 800 cm à l'échelle limnimétrique actuelle. D'après les résultats obtenus avec le 90 jaugeages effectués par le DNAEE, cette côte

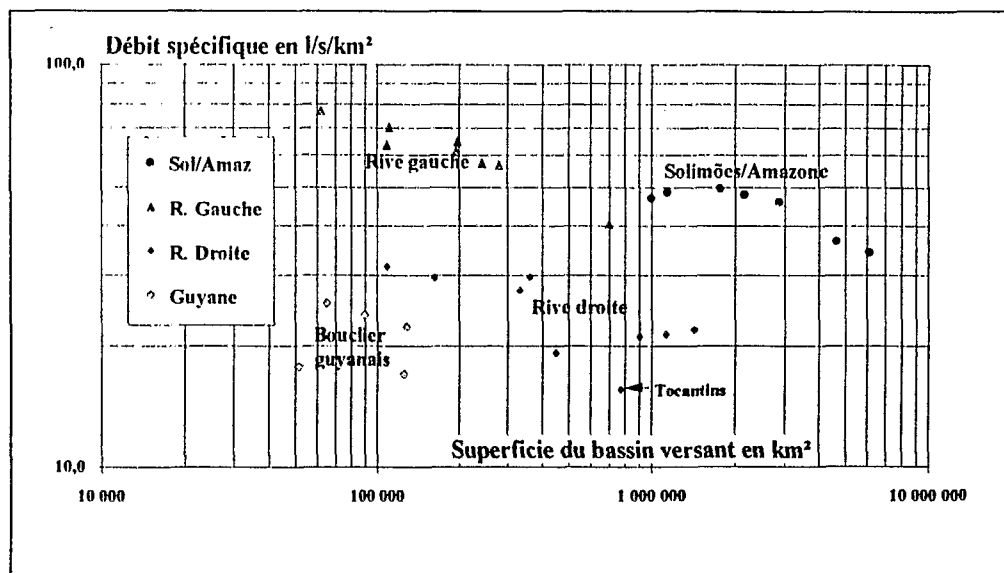


Figure 3 : Débits spécifiques des principaux affluents de l'Amazonie

correspond à un débit de 290000 à 300000 m³/s.

À la suite des jaugeages réalisés par US Geological Survey et la marine brésilienne, Oltman & al. (1964) avaient évalué la crue de 1953 à 270000 m³/s, pour une hauteur à l'échelle de cette époque de 760 cm. Quatre ans plus tard, Oltman (1968) donnait une nouvelle valeur de 350000 m³/s pour cette même crue. Celle-ci avait été reprise et même augmentée par Rodier et Roche (1978) qui donnaient un débit de 370000 m³/s à Obidos dans le Répertoire mondial des crues maximales observées. En considérant qu'il y a eu un décalage entre le zéro de l'échelle limnimétrique avant 1968 et le zéro de l'échelle actuelle et en se référant au 90 jaugeages du DNAEE, le débit maximum de cette crue record serait plutôt de 300000 m³/s.

Les 28 et 29 juin 1993, quelques jours après le passage du maximum (734 cm), un jaugeage a été réalisé par le DNAEE à la cote 706 cm. Le débit mesuré était de 259960 m³/s. Il ne s'agit pas de la plus forte cote jaugée (16 jaugeages ont été effectués à des côtes supérieures entre 1976 et 1982), mais du troisième en importance pour le débit après ceux de mai 1974 (H=741, Q=266900 m³/s) et de juillet 1975 (H=716, Q=262600 m³/s). Ce jaugeage permet d'avoir une très bonne approximation du débit de pointe de la crue de 1993 à Obidos, soit 270000 m³/s.

En extrapolant jusqu'à l'embouchure de l'Amazonie, et en tenant compte des apports des affluents en aval d'Obidos (Tapajos et Xingu principalement), on peut estimer que les crues record de 1953 et 1989 de

l'Amazonie ont apporté à l'océan Atlantique des débits instantanés de 360000 à 380000 m³/s. C'est cette valeur qui était, jusqu'à maintenant, attribuée à Obidos dont la superficie du bassin n'est que de 4619000 km² contre 6112000 km² à l'embouchure.

5. Disponibilité d'eau

5.1. Débits moyens annuels

Pour déterminer, avec le plus de précision possible, les débits moyens annuels du bassin amazonien, on a traité et analysé 90 stations hydrométriques des principaux bassins versants de la région amazonienne. La critique et l'homogénéisation par la Méthode du Vecteur Régional (Hiez, 1977 ; Hiez et Telles, 1983) des données hydrométriques de ces postes ont permis de définir 11 sous-bassins hydrographiques principaux englobant l'ensemble du bassin amazonien et une partie du Pantanal (zones inondées) avec l'inclusion du bassin du Tocantins.

Le tableau 1 ci-dessous présente les débits évalués aux exutoires des 11 sous-bassins des principaux affluents de l'Amazonie à partir de l'extrapolation des débits calculés aux 90 stations principales citées ci-dessus.

5.2. Régionalisation des débits

À partir des valeurs obtenues sur ces 11 bassins, auxquels ont été rajoutés les résultats acquis sur les 24 bassins intermédiaires des rivières Purus, Madeira et Rio Negro, on a recherché une relation entre les débits

Nom de la rivière	Localisation de l'exutoire	Superficie km ²	Pluviométrie (mm)	Lame écoulée (mm)	Débit (m ³ /s)	Débit spécifique l/s/km ²	Déficit d'écoul. (mm)
Solimões	S. Paulo de Oliv	990 780	2 900	1 481	46 500	46,90	1 419
Purus	Confluence	370 000	2 336	938	11 000	29,70	1 398
Solimões	Manacapuru	2 147 740	2 880	1 513	103 000	48,00	1 367
Rio Negro	Manaus	696 810	2 566	1 286	28 400	40,80	1 280
Amazone	Jatuarana	2 854 300	2 780	1 452	131 400	46,00	1 328
Madeira	Confluence	1 420 000	1 940	693	31 200	22,00	1 247
Amazone	Obidos	4 618 750	2 520	1 153	168 700	36,50	1 367
Tapajos	Confluence	490 000	2 250	869	13 500	27,60	1 381
Xingu	Confluence	504 300	1 930	607	9 700	19,20	1 323
Amazone	Embouchure	6 112 000	2 460	1 079	209 000	34,20	1 381
Tocantins	Confluence	757 000	1 660	492	11 800	15,60	1 168

Tableau 1 : Grands sous-bassins amazoniens

moyens annuels (Q), la superficie du bassin (A) et la pluviométrie annuelle (P).

Une analyse de variance effectuée sur cet échantillon de 35 débits moyens annuels a mis en évidence le rôle prépondérant de la superficie du bassin. En fait, dans cette région où la répartition de la pluviométrie varie relativement peu, aussi bien dans l'espace que dans le temps, il paraît normal que le facteur principal de la variabilité de la production d'eau soit la superficie de la zone de captation du bassin hydrographique. On a donc recherché une relation $Q = f(A)$ entre la superficie de ces bassins et leur débit moyen annuel. Une étude plus fine a montré que la dispersion des points représentatifs des couples « superficie/débit moyen annuel » autour de cette courbe $Q = f(A)$ était étroitement corrélée à la pluviométrie. Cela a permis d'établir une régression entre les écarts à cette courbe et la pluviométrie moyenne inter-annuelle de chaque bassin et, de cette manière, définir une relation entre Q, A et P.

Une première régression entre les débits (Q) et la superficie (A) de ces 35 bassins a permis de définir une courbe moyenne représentée par la relation suivante :

$$Q = A/29,2$$

où les débits sont exprimés en m³/s et les superficies des bassins versants en km².

Les points situés au-dessous de la courbe moyenne correspondent aux totaux pluviométriques moyens annuels inférieurs à 2460 mm et à des totaux supérieurs à 2460 mm pour les points situés au-dessus de la courbe. La valeur 2460 mm représente la pluviométrie moyenne annuelle du bassin amazonien. Une régression linéaire entre les écarts à courbe moyenne (I) et la pluviométrie moyenne inter-annuelle

de chacun de ces bassins a permis d'établir la relation donnant le débit moyen inter-annuel (Q) en m³/s en fonction de la superficie du bassin (A) en km² et la pluviométrie moyenne inter-annuelle de ce bassin (P) en mm :

$$Q = \frac{A}{236} e^{P/1178} \quad (2)$$

Deux points s'écartent très sensiblement de la moyenne régionale, il s'agit des deux bassins du Guaporé (figure 4). Le bassin amont de cette rivière, dans le Pantanal brésilien et les Llanos boliviens, est occupé par de vastes régions inondées qui retiennent la presque totalité des eaux qui y arrivent. Ces régions ne restituant pratiquement aucun apport vers les zones situées plus en aval, il semblerait donc logique de diminuer les superficies des bassins versants concernés de l'aire de ces zones inactives. Ceci aurait pour conséquence de rapprocher ces deux points de la courbe moyenne (2).

Malgré cela, cette relation (2) peut être considérée comme satisfaisante pour les grands bassins de la région amazonienne dont la superficie est supérieure à 10000 km². Il serait cependant peut-être nécessaire de modifier les coefficients en fonction des caractères particuliers des différentes zones de cet immense bassin. Pour cela, une étude plus détaillée est en cours. Elle fait intervenir les caractéristiques physiographiques de chacun des bassins hydrographiques analysés de manière à aboutir à une régionalisation plus précise des débits.

6. Conclusion

Bien que la régionalisation des débits du bassin amazonien ne soit pas encore totalement terminée,

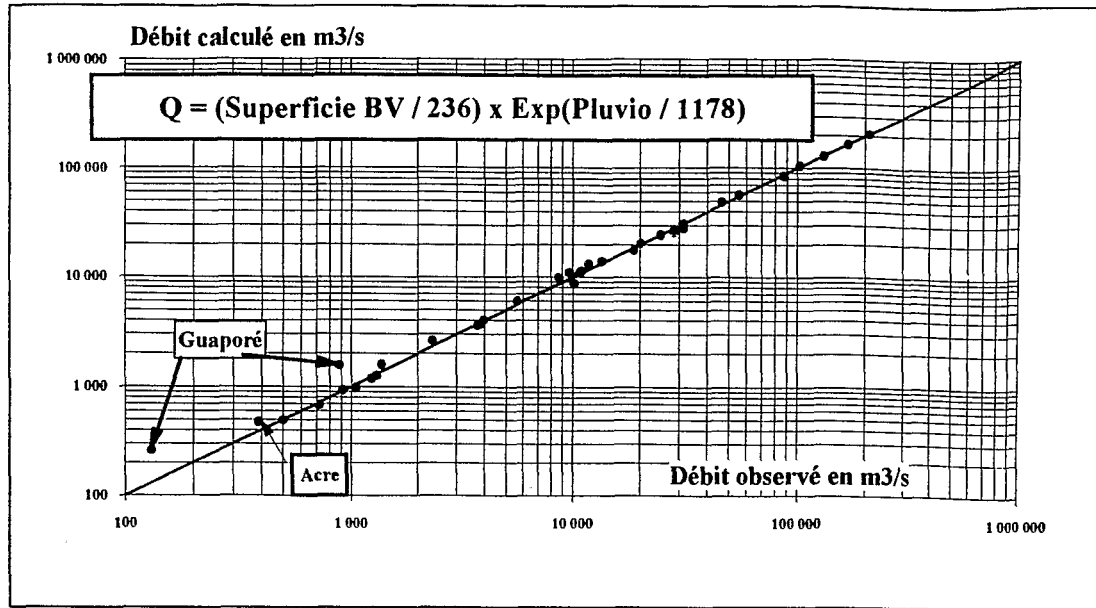


Figure 4 : Débits observés x Débits calculés

l'analyse et le traitement des données hydropluviométriques des principaux bassins hydrographiques de la région amazonienne a permis de déterminer, pour la première fois, les apports des différents tributaires avec une assez grande précision. Ainsi le module de l'Amazone à son embouchure est à pu être estimé à 209000 m³/s (Molinier & al, 1992). Ces résultats seront complétés et affinés par l'étude en cours sur le bilan hydrique superficiel du bassin amazonien (Programme HIBAM).

7. Bibliographie

- Davis L.C. (1964) : The Amazon's rate of flow, *Natural History*, 73, pp. 14-19
- Hiez G. (1977) : L'homogénéité des données pluviométriques, *Cahiers ORSTOM*, Série Hydrologie, Paris, V. 14, n°2, pp. 129-172
- Hiez G., Telles C. (1983) : SIH Sistema de Informação Hidrometeorologica. Subsistema de modelos matematicos. Modelo do Vetor Regional, Brasilia-DF, DNAEE, DCRH.
- Hiez G., Cochonneau G., Séchet P., Medeiros Fernandes U. (1991) : Aplicação do método do vetor regional a analise da pluviometria anual da bacia amazônica, pp. 367-377. In *IX Simposio Brasileiro de Recursos Hidricos*, ABRH, Rio de Janeiro.
- Le Cointe P. (1935) : Les crues annuelles de l'Amazone et les récentes modifications de leur régime. *Annales de Géographie*, 44, pp. 614-619
- Meade R.H., Rayol J.M., Conceição S.C. (da), Natividade J.R.G. (1991) : Backwater effects in the Amazon river basin of Brazil. *Environ. Geol. Sci.* 18(2), pp. 105-114
- Molinier M. (1992) : Régionalisation des débits du bassin amazonien, *VIII Journées Hydrologiques. Régionalisation en hydrologie et application au développement ORSTOM*, Montpellier
- Molinier M., Silva Maia A.C. (de), Ferreira dos Santos D. (1991) : Balanço hidrico da Bacia Amazônica, Metodologia e primeiros resultados, pp. 158-167. In *IX Simposio Brasileiro de Recursos Hidricos*, ABRH, Rio de Janeiro
- Molinier M., Cudo K.J., Guimaraes V. (in press) : Disponibilidade de agua na bacia amazônica. In *Simposio Int. de Estudos Ambientais em Florestas Tropicais Umidas, Forest'92*, Rio de Janeiro
- Nimer E. (1991) : Clima, 61-71. In *Geografia do Brasil*, Volume 3, Região Norte. Publ. IBGE, Rio de Janeiro
- Nordin C.F., Meade R.H. (1982) : Deforestation and increased flooding of the upper Amazon. *Science*, 215, pp. 426-427.
- Oltman R.E., Sternberg H.O'R, Ames F.C., Davis L.C. (1964) : Amazon river investigations reconnaissance measurements of July 1963, *US Geological Survey Circular 486*, 15 p.
- Oltman R.E. (1968) : Reconnaissance investigations of the discharge and water quality of the Amazon river, *US Geological Survey Circular 552*, 16 p.
- Pardé M. (1936) : Les variations saisonnières de l'Amazone, *Annales de Géographie*, 45, pp. 502-511
- Pardé M. (1954) : Sur le régime et spécialement sur les variations saisonnières des cours d'eau brésiliens, *La Houille Blanche* 6, pp. 823-846

- Pardé M. (1965) : Sur les débits monstrueux de l'Amazonie, *Annales de Géographie* 401, pp. 113-114
- Pardé M. (1966) : Nouveautés sur les débits monstrueux de l'Amazonie, *Annales de Géographie*, pp. 202-208
- Rodier J.A., Roche M. (1978) : World catalogue of maximum observed flood - Répertoire mondiale des crues maximales observées, *IAHS - AIHS Publication*, 143 p.
- Richey J.E., Meade R.H., Salati E., Devol A.H., Nordin C.F., Santos U. (dos) (1986) : Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon river: 1982-1984, *Water Resources Research*, 22(5), pp. 756-764
- Richey J.E., Mertes L.A.K, Dunne T., Victoria R.L., Forsberg B., Tancredi A.C.N.S., Oliveira E. (1989) : Sources and routing of the Amazon river flood wave, *Global Biogeochemical cycles* 3(3), pp. 191-204
- Salati E., Marques J., Molion L.C.B. (1978) : Origem e distribuição das chuvas na Amazônia, *Interciencia* 3(4), pp. 200-205

