

## RÉGIONALISATION DES DÉBITS DU BASSIN AMAZONIEN PREMIERS RÉSULTATS

M. MOLINIER<sup>1</sup>

---

### RÉSUMÉ

Une étude, actuellement en cours au DNAEE (Département National des Eaux et de l'Énergie Électrique) à Brasilia (Brésil), se propose d'évaluer les principaux termes du bilan hydrologique de surface (pluie, écoulement, évapotranspiration réelle) du bassin amazonien sur une période de 15 à 20 ans. Un premier travail très détaillé sur les bassins du Purus et du Madeira, affluents rive droite du Solimões/Amazone, a permis d'établir une relation entre les débits moyens interannuels, la superficie des bassins et la pluviométrie interannuelle moyenne. La régionalisation de cette relation a conduit à distinguer trois groupes différents de bassins hydrographiques pour lesquels on a tenté de déterminer les caractéristiques physiographiques communes.

Une étude plus globale de l'ensemble du bassin amazonien a permis de sélectionner 11 bassins principaux dont la superficie varie de 370 000 km<sup>2</sup> (Purus) à 6 112 000 km<sup>2</sup> (totalité du bassin de l'Amazone, Tocantins exclu). L'analyse des données de ces bassins et des bassins de quelques autres stations plus en amont, a montré que les débits moyens interannuels étaient fortement corrélés à l'aire de drainage du bassin et que la dispersion autour de la courbe moyenne était très bien expliquée par la pluviométrie moyenne interannuelle de chacun de ces bassins. Ce travail a abouti à l'établissement d'une relation unique entre ces trois termes. Cependant, quelques écarts relativement importants entre les débits calculés et les débits observés montrent qu'il faut étendre cette analyse à un plus grand nombre de bassins et, notamment, à des bassins plus petits.

---

<sup>1</sup> Hydrologue Orstom-DNAEE Brasilia - Brésil

## INTRODUCTION

Dans le cadre de la convention signée entre le CNPq (Conseil National de Développement Scientifique et Technologique du Brésil) et l'Orstom, un programme est actuellement en cours au DNAEE (Département National de l'Eau et de l'Énergie Électrique) à Brasilia sur l'évaluation des termes du bilan hydrologique du bassin amazonien.

Une étude, assez détaillée, au pas de temps annuel et mensuel, a déjà été faite sur les bassins des rivières Purus et Madeira, affluents rive droite du Solimões/Amazone (Molinier *et al.*, 1991). La superficie de ces deux bassins représente près de 30 % de celle du bassin amazonien (Tocantins exclu).

Les autres sous-bassins amazoniens sont actuellement en cours de traitement. Cependant, afin de couvrir l'ensemble de cette région et pour répondre à une demande de nos partenaires, les stations hydrométriques principales de chacun de ces sous-bassins ont été analysées et traitées en priorité. Toutefois, comme la méthodologie mise au point suppose que chaque sous-bassin soit étudié séparément, avec analyse, critique et homogénéisation des données de l'ensemble des stations de ces sous-bassins et, ensuite, intégration et homogénéisation au niveau du bassin total, il faut considérer que certains des résultats présentés ici ne sont que provisoires.

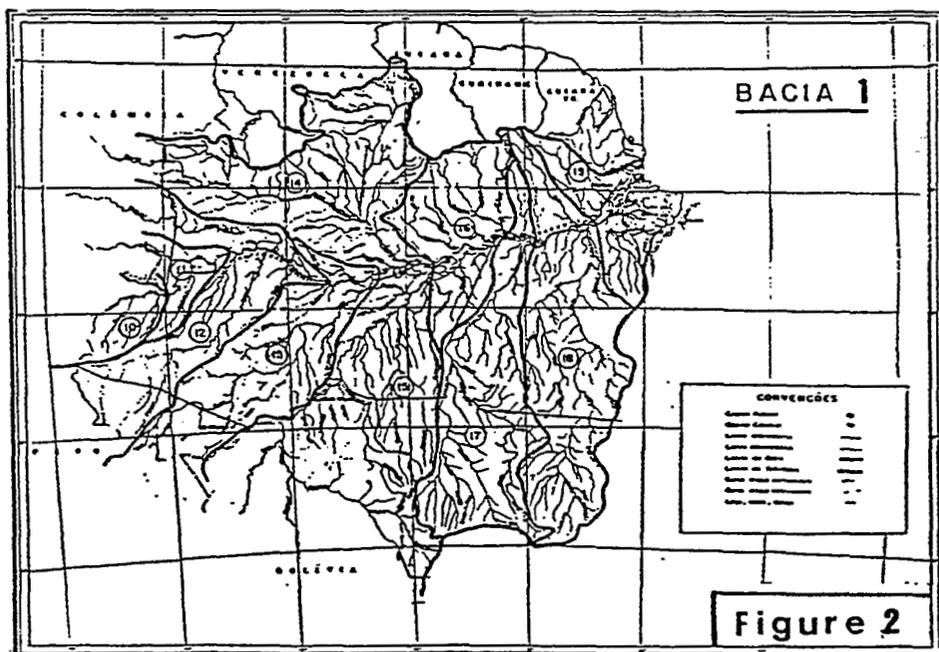
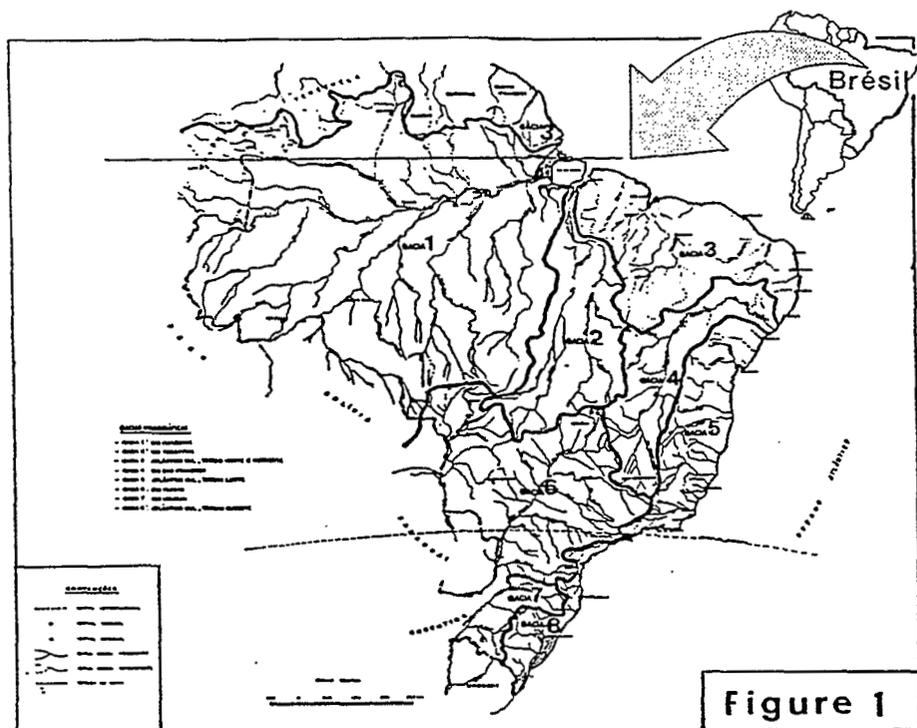
Une première tentative de régionalisation des débits est donc effectuée ici sur les bassins du Purus et du Madeira, puis étendue à l'ensemble du bassin amazonien en utilisant les données disponibles. L'influence de certains facteurs déterminants sur les débits sera également discutée.

## DONNÉES DISPONIBLES ET MÉTHODOLOGIE

### HYDROMÉTRIE

La CGRH (Coordination Générale des Ressources en Eau) du DNAEE, qui a la charge de la gestion du réseau hydrométrique brésilien, a subdivisé l'ensemble du territoire brésilien en 8 grands bassins principaux (figure 1). Le bassin amazonien (Bacia 1) est lui-même divisé en 10 sous-bassins numérotés de 10 à 19 (figure 2). Le bassin du Tocantins, dont l'embouchure se trouve à l'est de l'île de Marajó (celle de l'Amazone étant située à l'ouest) est considéré comme un autre grand bassin (Bacia 2).

Des 350 stations hydrométriques que comporte l'ensemble du bassin amazonien, 220 sont gérées directement par le DNAEE. Une première étude a été faite sur les bassins des rivières Purus et Madeira (sous-bassins 13 et 15). Une sélection



**Figures 1 et 2**  
Bassins hydrographiques du Brésil

préliminaire, tenant compte de la qualité des observations limnimétriques, des jaugeages et des courbes d'étalonnage, a permis de retenir 56 stations hydrométriques, 29 sur le bassin du Purus et 27 sur le bassin du Madeira. Il faut noter que si le bassin du Purus est presque entièrement en territoire brésilien (seuls 5 % sont situés en territoire péruvien et bolivien), le Brésil ne possède que 38 % du bassin du Madeira. Les 27 stations hydrométriques mentionnées ci-dessus sont toutes brésiliennes, même si parfois elles contrôlent un bassin versant situé dans sa quasi-totalité dans un autre pays. C'est le cas, par exemple, de la station de Abunã sur le Madeira qui contrôle un bassin de 890 000 km<sup>2</sup> dont seulement 10 % sont sur le territoire brésilien.

Après une première critique, l'homogénéisation de ces données a été effectuée en appliquant la Méthode du Vecteur Régional (MVR) de (HIEZ., 1977). Cette méthode modélise l'information hydrométrique (ou pluviométrique) régionale en utilisant un modèle mathématique basé sur le maximum de vraisemblance et appliqué aux données mesurées sur un ensemble de stations d'observation regroupées en régions homogènes (HIEZ ET TELLES., 1983). Le vecteur est constitué par une série chronologique et synthétique d'indices hydrométriques (ou pluviométriques) annuels ou mensuels représentatifs de chacune de ces régions réputées homogènes. Lors de la critique des données, c'est à ce vecteur de référence ou « Vecteur Régional » que chacune des stations d'observation est comparée.

Un premier passage a permis de générer 3 vecteurs pour chacun des bassins, un en aval, un en amont et un intermédiaire et, ainsi, éliminer 9 stations douteuses ou sans données suffisantes. Finalement, l'échantillon retenu comprend 47 stations hydrométriques, 23 du bassin du Purus et 24 du Madeira. On a inclus dans l'étude les stations du Solimões à Itapeua (1 769 000 km<sup>2</sup>) et Manacapuru (2 147 700 km<sup>2</sup>). La superficie des bassins contrôlés par les autres stations varie entre 946 km<sup>2</sup> (Pacaás Novos à Seringal São Luis) et 1 124 000 km<sup>2</sup> (Madeira à Manicoré).

Afin de compléter cette étude et de l'étendre à l'ensemble du bassin amazonien, comme mentionné dans l'introduction, plusieurs stations hydrométriques d'autres sous-bassins ont été incorporées à cet échantillon. Il s'agit de celles du Solimões à l'amont de son cours brésilien, du Rio Negro et Rio Branco, du Tapajos, du Xingu et des stations aval de l'Amazone (Jatuarama : 2 854 300 km<sup>2</sup> et Obidos : 4 618 750 km<sup>2</sup>). Enfin, bien que ne faisant pas réellement partie du bassin amazonien, on a rajouté quelques stations de l'aval du Tocantins.

Pour toutes ces stations, le même travail de critique a été effectué, mais l'homogénéisation par la méthode du Vecteur Régional, au pas de temps mensuel, a été plus grossière, avec des superficies beaucoup plus importantes attribuées à chaque vecteur. Cependant, les résultats obtenus ont été très satisfaisants et ont permis d'effectuer l'interprétation présentée ci-dessous ( paragraphes p.489 et p.490). La période commune retenue va de 1973 à 1989.

## PLUVIOMÉTRIE

Après critique des données pluviométriques, la même méthode du Vecteur Régional au pas de temps mensuel a été utilisée pour homogénéiser les données sur la même période 1973-1989.

Pour les bassins du Purus et du Madeira, on a tout d'abord sélectionné 220 stations brésiliennes avec lesquelles on a défini 20 régions élémentaires. Cette première homogénéisation a permis de retenir 77 stations pluviométriques brésiliennes auxquelles ont été ajoutées 18 stations boliviennes du SENAMHI (Service National de Météorologie et Hydrologie de Bolivie).

En ce qui concerne le reste du bassin amazonien, il n'a pas encore été possible d'effectuer un travail de critique et d'homogénéisation aussi détaillé. Des études anciennes (DNAEE., 1985) et plus récentes (HIEZ *et al.*, 1991) ont été reprises et actualisées pour couvrir la même période de 17 ans.

## RÉGIONALISATION DES DÉBITS

### BASSINS DES RIVIÈRES PURUS ET MADEIRA

Dans le document déjà cité (MOLINIER *et al.*, 1991), un premier essai de régionalisation de débits avait été tenté. Une analyse de variance faite sur l'échantillon des 49 débits moyens interannuels avait mis en évidence le rôle prépondérant de la superficie du bassin versant (figure 3). En effet, dans cette région où la répartition de la pluviométrie est relativement homogène et varie relativement peu, aussi bien dans l'espace que dans le temps, il est normal que le facteur principal de la variabilité de la production d'eau aux exutoires soit l'aire de captation du bassin versant. Cependant, une étude plus fine de la dispersion des points représentatifs du couple « superficie du bassin/débit moyen interannuel » a montré que celle-ci était très fortement corrélée à la pluviométrie. Afin de mettre ceci en évidence, l'échantillon a été divisé en trois groupes de manière à prendre en considération les écarts à la droite de régression entre les débits observés et les débits calculés par la corrélation entre les superficies des bassins versants et les débits moyens interannuels représentés sur la figure 3.

La répartition a été faite de la manière suivante :

- groupe 1 : débits pour lesquels la valeur observée dépasse de 10 % la valeur calculée ;
- groupe 2 : débits pour lesquels la valeur observée est comprise entre + 90 % et 110 % de la valeur calculée ;
- groupe 3 : débits pour lesquels la valeur observée est inférieure à 90 % de la valeur calculée.

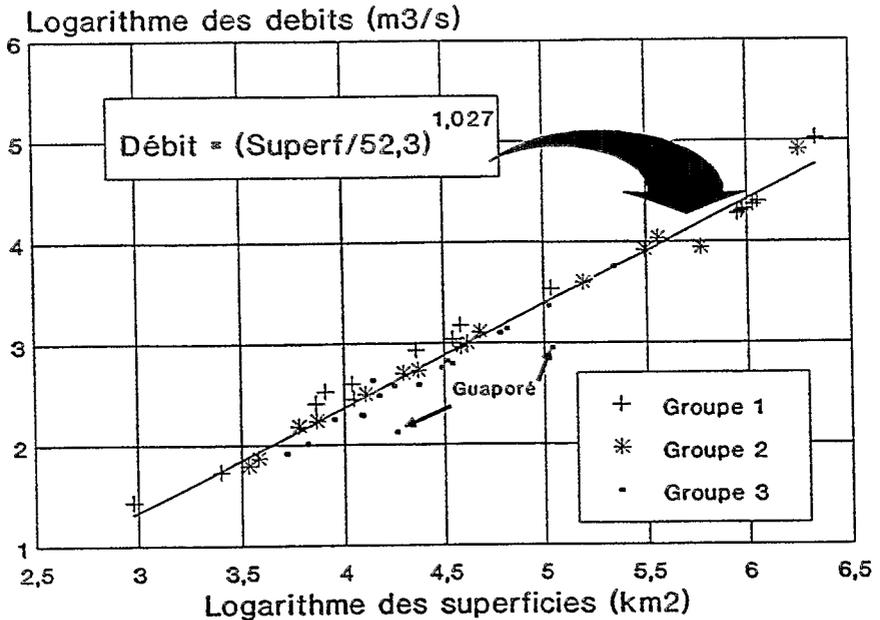


Figure 3  
Bassin du Purus  
Débit (m<sup>3</sup>/s)

Le graphique de la figure 4 où sont reportés, pour chacun des trois groupes, les points représentatifs de la pluviométrie moyenne annuelle en fonction des écarts relatifs entre les débits observés et calculés des 49 sous-bassins hydrographiques, montre bien que la pluviométrie est un facteur explicatif de cette dispersion comme représenté sur la figure 3. Les écarts positifs correspondent, en général à une forte pluviométrie alors, qu'à l'inverse, les écarts négatifs correspondent à une pluviométrie plus faible.

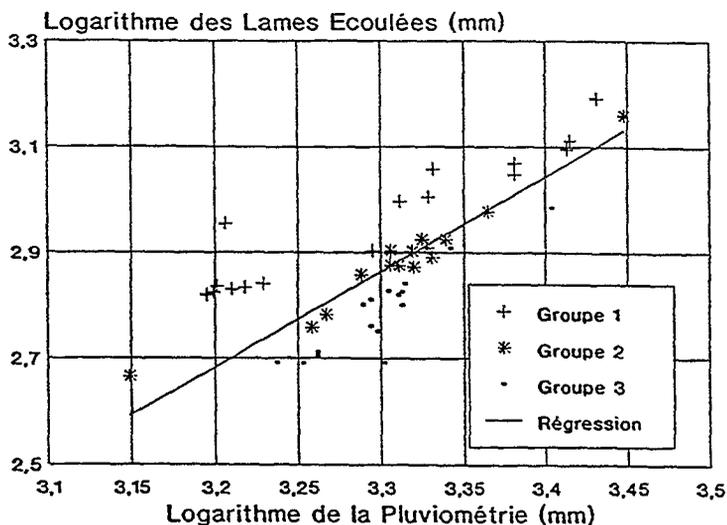
On a donc recherché une relation entre les trois paramètres suivants, débit (Q), superficie du bassin versant (A) et pluviométrie (P) pour chacun des groupes de stations hydrométriques. Les résultats obtenus sont donnés ci-dessous :

$$\text{Groupe 1 } Q = (A^{1,012} / 28,5) * (P / 2500)^{1,56} \quad (1)$$

$$\text{Groupe 2 } Q = (A^{1,011} / 33,3) * (P / 2500)^{1,67} \quad (2)$$

$$\text{Groupe 3 } Q = (A^{1,022} / 43,5) * (P / 2500)^{1,73} \quad (3)$$

L'amélioration obtenue en utilisant ces 3 relations est certes satisfaisante, puisque l'on passe d'un écart quadratique moyen de 1 290 m<sup>3</sup>/s, avec la relation de la figure 3, à un écart de 146 m<sup>3</sup>/s avec ces trois dernières relations. Cependant, il est peut-être préférable de ne retenir qu'une seule relation, comme proposé ci-dessous.

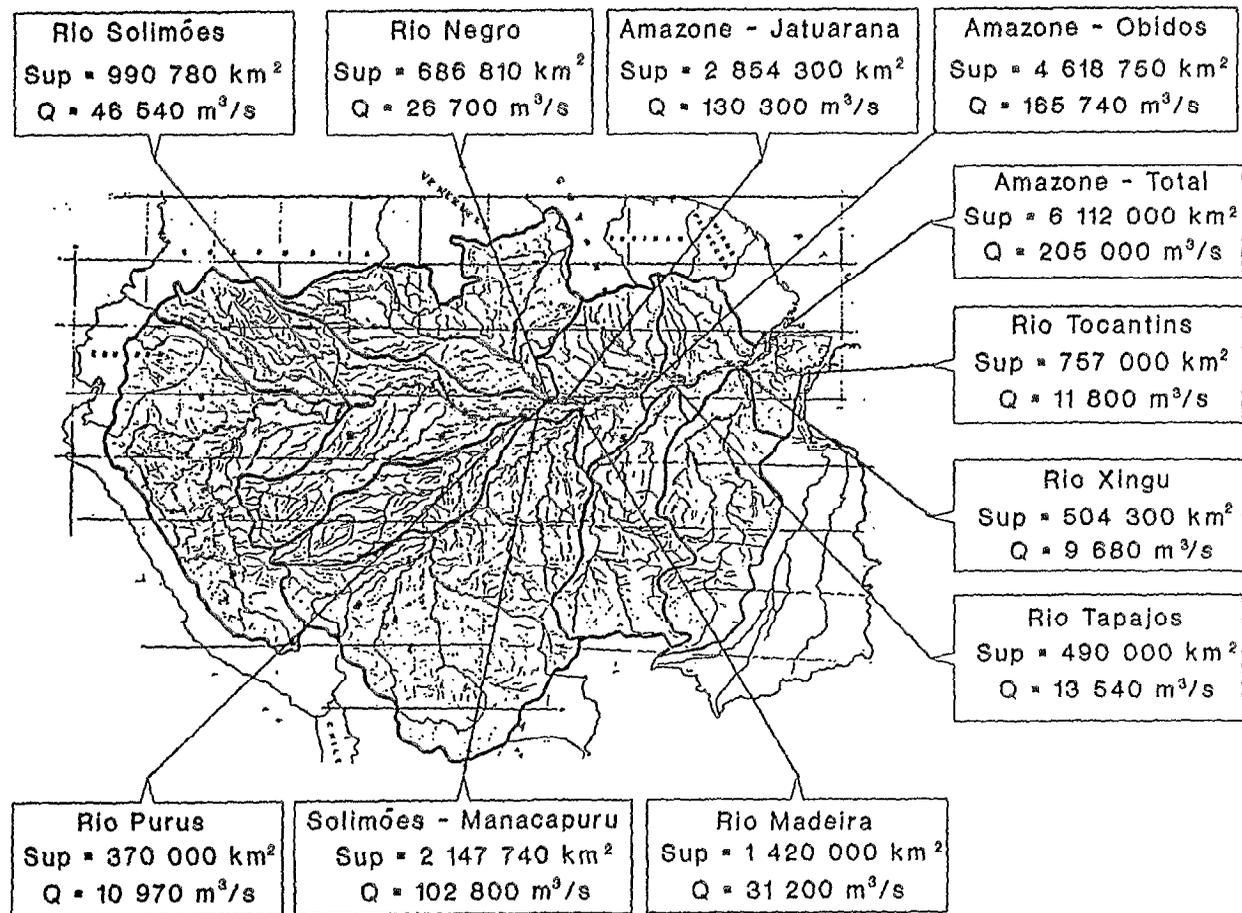


**Figure 4**  
Bassin du Madeira  
Lame écoulée (mm)

## ENSEMBLE DU BASSIN AMAZONIEN

Les bassins du Purus et du Madeira constituent deux des 10 sous-bassins amazoniens de la classification du DNAEE (bassins 13 et 15 de la figure 2). L'étude détaillée des termes du bilan hydrologique se poursuit normalement sur les huit autres sous-bassins. Cependant, pour diverses raisons, dont celles citées en introduction, seules les stations hydrométriques principales de ces autres sous-bassins ont été traitées en priorité. La taille de l'échantillon obtenu en incluant les stations du Purus et du Madeira est de 74.

La critique et l'homogénéisation des données hydrométriques de ces stations ont permis de sélectionner 11 sous-bassins principaux qui couvrent l'ensemble de la région amazonienne et même une partie du Pantanal avec l'inclusion du bassin du Tocantins. La carte de la figure 5 donne la localisation de l'exutoire de chacun de ces sous-bassins ainsi que la superficie du bassin versant drainé et le débit moyen annuel estimé. Ces données sont reprises dans le tableau 1 ci-après. A la station du Rio Negro à Manaus seules les côtes sont observées. En raison de la proximité de la confluence avec le Solimões, il est en effet, impossible d'y effectuer des mesures de débit. Les débits moyens annuels ont été estimés à partir des stations amont du Rio Negro et de son affluent principal le Rio Branco et, aussi, à l'aide des résultats obtenus sur le Solimões à Manacapuru, l'Amazone à Jatuarana et le Paraná do Careiro.



**Figure 5**  
*Bassins de l'Amazone et du Tocantins*

Les débits calculés aux différentes stations des principaux tributaires de l'Amazonie ont été extrapolés à l'ensemble des sous-bassins de ces affluents. C'est à partir des valeurs obtenues sur ces sous-bassins que l'on a cherché une relation entre les débits moyens interannuels ( $Q$ ), la superficie du bassin versant ( $A$ ) et la pluviométrie annuelle ( $P$ ).

**Tableau 1**  
Grands sous-bassins amazoniens

Rivière	Station	Superficie km <sup>2</sup>	Pluvio mm	Lame mm	Débit m <sup>3</sup> /s	Q spéc l/s/km <sup>2</sup>	Déficit mm
Purus	Confluence	370 000	2 336	935	10 970	29,6	1 401
Tapajos	Confluence	490 000	2 250	872	13 540	27,6	1 378
Xingu	Confluence	504 300	1 930	605	9 680	19,2	1 325
Rio Negro	Manaus	686 810	2 476	1 226	26 700	38,9	1 250
Tocantins	Confluence	757 000	1 660	492	11 800	15,6	1 168
Solimões	Frontière	990 780	2 900	1 481	46 540	47,0	1 419
Madeira	Confluence	1 420 000	1 822	693	31 200	22,0	1 129
Solimões	Manacapuru	2 147 740	2 880	1 509	102 800	47,9	1 371
Amazonie	Jatuarana	2 854 300	2 780	1 440	130 300	45,7	1 340
Amazonie	Obidos	4 618 750	2 520	1 132	165 740	35,9	1 388
Amazonie	Embouchure	6 112 000	2 460	1 058	205 000	33,5	1 402

Une première régression entre les débits ( $Q$ ) et la superficie ( $A$ ) a montré que la dispersion autour de la courbe moyenne

$$Q = A / 30 \quad (4)$$

des points représentatifs des débits moyens interannuels en fonction de la superficie du bassin versant est très bien expliquée par la pluviométrie interannuelle (figure 6). Les points situés au-dessous de la courbe moyenne correspondent à des totaux pluviométriques inférieurs à 2 500 mm et inversement pour les points supérieurs. La valeur de 2 500 mm représente la pluviométrie annuelle moyenne du bassin amazonien qui a été évaluée à 2 460 mm. Parmi ces 11 sous-bassins, seul fait exception le Rio Negro à Manaus. En effet, malgré un total pluviométrique de 2 476 mm, le point représentatif de cette affluent de l'Amazonie est situé au-dessus de la courbe moyenne (4). Il semblerait que cette pluviométrie soit sous-estimée. Celle-ci a été calculée en actualisant les données du document du

(DNAEE., 1985) déjà cité ci-dessus. Il serait, cependant, nécessaire de revoir plus en détail les observations pluviométriques de la partie nord-ouest de ce bassin, travail qui est actuellement en cours.

Une régression linéaire entre les écarts à la courbe moyenne (4) et la pluviométrie moyenne, a permis d'aboutir au graphique de la figure 7 et à la relation donnant le débit moyen interannuel ( $Q$ ) en m<sup>3</sup>/s, en fonction de la superficie du bassin versant ( $A$ ) en km<sup>2</sup> et la pluviométrie moyenne interannuelle ( $P$ ) en mm :

$$Q = A / 259,5 * e^{P/1133} \tag{5}$$

Deux points s'écartent d'un peu plus de 10 % de la moyenne régionale. Il s'agit du Rio Negro comme l'on pouvait s'y attendre à la suite de la remarque faite ci-dessus et du Rio Madeira. Pour ce dernier, la relative hétérogénéité de son bassin peut expliquer cette différence. En effet, en Bolivie où se trouve plus de 60 % du bassin, ce fleuve coule d'abord dans le massif andin (15 % du bassin) pour ensuite traverser des savanes inondables avant d'atteindre le bouclier brésilien et la grande forêt amazonienne où son régime devient comparable à celui du Purus.

Cette relation (5) peut être considérée comme satisfaisante pour les grands bassins de superficie supérieure à 100 000 km<sup>2</sup>, mais qu'en est-il pour les autres bassins de superficie plus faible ?

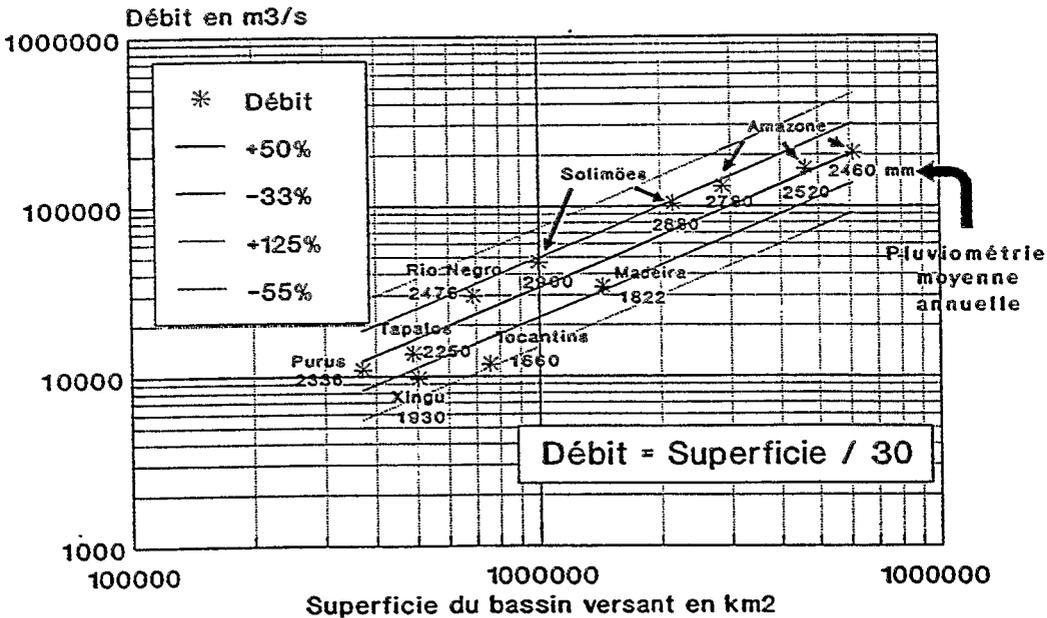


Figure 6  
Bassin Amazonien  
Relation débit/superficie de 11 bassins

Pour répondre à cette question, on a repris l'échantillon de 74 stations et recherché les mêmes corrélations entre les débits et les superficies des bassins d'une part, et les écarts à la droite de régression et la pluviométrie d'autre part. La relation obtenue est légèrement différente :

$$Q = A^{1,04} / 381 * e^{P/1175} \quad (6)$$

La comparaison des moyennes et des variances de chacun des échantillons de débits calculés avec les relations (5) et (6), a montré que les résultats obtenus avec la première relation étaient plus satisfaisants. Ce fait serait dû au poids plus important, dans l'échantillon des 74 stations, des bassins versants de moyenne importance dont la superficie est inférieure à 50 000 km<sup>2</sup>. Ce qui a pour conséquence d'augmenter les écarts entre les valeurs calculées et observées pour les très grands bassins (superficie supérieure à 500 000 km<sup>2</sup>). C'est donc la relation (5) qui a été conservée pour l'ensemble du bassin amazonien.

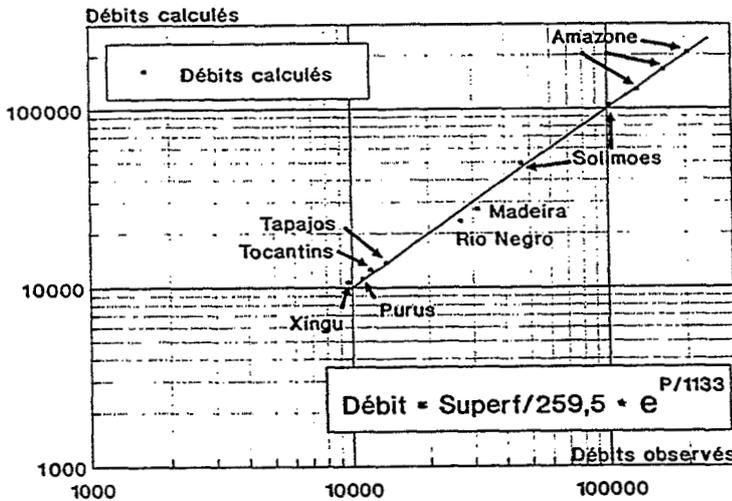


Figure 7

Bassin Amazonien

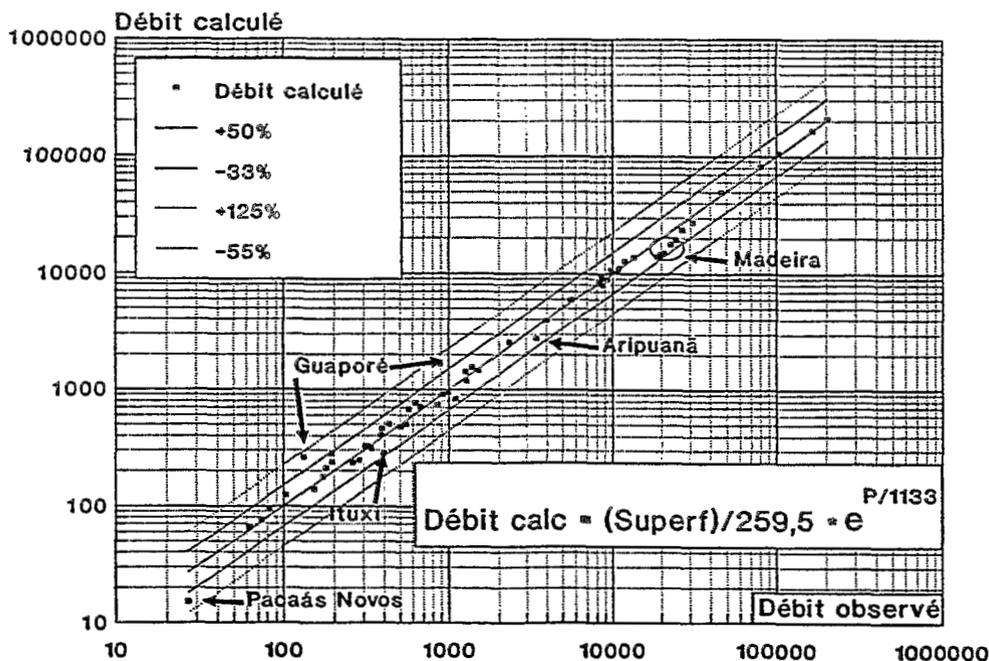
Débits moyens annuels par sous-bassin

## INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Lors de l'étude des bassins versants des rivières Purus et Madeira, une première tentative de régionalisation prenant en compte les paramètres physiographiques, a montré que les bassins versants du groupe 1 (écoulement plus important que la moyenne) se situent, en général, sous forêt dense avec un relief un peu plus accentué. C'est le cas de l'aval des bassins du Madeira et Aripuana (affluent du Madeira). Dans ce groupe, on retrouve parfois certains petits bassins des zones dégradés du sud du Madeira brésilien comme l'amont des

bassins des rivières Pacaás Novos et Jiparaná. Au contraire, les bassins du groupe 3, pour lesquels l'écoulement est inférieur à la moyenne régionale, se trouvent dans des régions de forêt ombrophile plus dense et/ou avec un relief moins accentué (haut Purus et Pimenta Bueno), ou dans des zones perméables (Acre qui est un affluent rive droite du Purus).

Pour ce qui est de l'ensemble du bassin amazonien, on peut observer sur la figure 8 où sont reportés les résultats obtenus avec la relation (5), que certains points s'écartent sensiblement de la courbe moyenne. C'est le cas, en particulier, du rio Guaporé dont le débit observé est très nettement inférieur au débit estimé par la relation. Cette rivière a un régime assez différent en raison de l'ampleur des zones inondables traversées en Bolivie. Une grande partie des eaux est stockée dans ces zones pour être, ensuite, reprise par évaporation. En ce qui concerne les autres points remarquables, certaines explications ont été avancées dans le paragraphe précédent, mais elles sont encore insuffisamment étayées. Il est indispensable d'attendre la fin de l'étude détaillée de chacun des sous-bassins amazonien pour tenter d'expliquer la dispersion observée et ainsi aboutir à une meilleure régionalisation des débits.



**Figure 8**  
Ensemble du Bassin Amazonien  
Débits moyens interannuels

## CONCLUSION

On voit donc que la régionalisation des débits du bassin amazonien est encore embryonnaire. Il est nécessaire de poursuivre les études et, surtout, d'y inclure le plus grand nombre possible des stations hydrométriques des sous-bassins non encore suffisamment étudiés. La comparaison des résultats obtenus avec la physiographie de chacun des bassins devrait permettre une meilleure interprétation de ces résultats et donc, une approche plus fine de la régionalisation des débits.

Il faudra aussi étendre l'étude aux débits moyens annuels, et non plus seulement aux débits moyens interannuels.

Il faut noter, que si cette étude a permis de mettre en évidence l'influence de l'action anthropique sur les débits de certains petits bassins fortement dégradés (surtout l'amont du rio Jiparaná) lors de l'analyse des données de la région, il n'a pas été possible de déceler une altération quelconque des termes du bilan hydrologique au niveau régional, c'est-à-dire, pour les grands bassins hydrographiques. Pour les bassins de moindre importance, même s'il y a eu des altérations des valeurs moyennes régionales, celles-ci ont été occultées par l'influence prépondérante du régime pluviométrique. Ainsi, par exemple, on a constaté que sur le Rio Negro à Manaus (687 000 km<sup>2</sup>), les valeurs moyennes pondérées sur 5 ans des côtes annuelles des 20 dernières années, étaient systématiquement au-dessus de la moyenne interannuelle (1902-1991). Mais, lorsqu'on examine la pluviométrie régionale de ce bassin, on s'aperçoit que les valeurs moyennes pondérées sont aussi supérieures à la moyenne interannuelle. On a fait les mêmes constatations pour le Xingu à Altamira où le bassin atteint une superficie de 477 000 km<sup>2</sup>. Il serait intéressant de vérifier si l'on observe le même phénomène sur les autres rivières et, en particulier, sur le Solimões à la frontière Pérou-Brésil. En effet, (GENTRY et LOPEZ-PARODI., 1980) avaient invoqué la déforestation des Andes pour justifier l'augmentation des maxima de la crue à Iquitos au Pérou.

Ce travail a aussi permis de déterminer la contribution du bassin amazonien à l'océan atlantique. Celle-ci est, en moyenne annuelle, de 205 000 m<sup>3</sup>/s, et de 217 000 m<sup>3</sup>/s si on ajoute le bassin du Tocantins. Ces valeurs ont été calculées en incluant les observations et mesures récentes (MOLINIER *et al.*, 1992 ; DNAEE., 1992). Elles correspondent aux estimations faites par (RICHEY *et al.*, 1989) qui donnent une fourchette de 200 000 à 220 000 m<sup>3</sup>/s pour l'ensemble Amazone et Tocantins.

## BIBLIOGRAPHIE

- COCHONNEAU G., HIEZ G., SECHET P., FERNANDES U.M., 1991. *Aplicação do Método do Vetor Regional à análise da pluviometria anual da bacia amazônica*. IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 10-14 novembre 1991, vol.1, 367-377.
- DNAEE., 1985. *Boletim Pluviométrico P-1.01 - Bacia do rio Amazonas*. Brasília-DF, DNAEE, DCRH.
- DNAEE., 1992. *Disponibilidade Hídrica do Brasil*. Brasília-DF, DNAEE, DCRH, (sous presse).
- GENTRY H., LOPEZ-PARODI J., 1980. *Science*, 210 p.
- HIEZ G., 1977. *L'homogénéité des données pluviométriques*. Cahiers Orstom, Série Hydrologie, Paris, vol. 14, n°2, 129-172.
- HIEZ G., TELLES C., 1983. *SIH Sistema de Informação Hidrometeorológica. Subsistema de modelos matemáticos. Modelo do Vetor Regional*. Brasília-DF, DNAEE, DCRH.
- MOLINIER M., MAIA A.C. DA S., SANTOS D., dos., 1991. *Balanço hídrico da bacia amazônica - Metodologia e primeiros resultados*. IX Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 10-14 novembre 1991, vol.1, 158-167.
- MOLINIER M., CUDO K.J., GUIMARAES V., 1992. *Disponibilidade de água na bacia amazônica*. Segundo Simpósio Internacional de Estudos Ambientais em Florestas Tropicais Umidas - Forest'92. Rio de Janeiro, Brésil, 24-29 mai 1992.
- RICHEY J.E., MERTES L.A., DUNNE T., VICTORIA R.L., FORSBURG B.R., TANCREDI A.C.N.S., OLIVEIRA E., 1989. *Sources and routing of the Amazon river flood wave*. Global biogeochemical cycles, vol.3, n°3, 191-204.