

SENAMHI

PHICAB

ORSTOM

**ETUDE DES DEBITS DU MAMORE
A GUAYARAMERIN**



J. BOURGES, J. CORTES, R. HOOREL BECKE

SENAMHI

PHICAB

ORSTOM

ETUDE DES DEBITS
DU MAMORE A GUAYARAMERIN

J.BOURGES, J.CORTES, R.HOORELBECKE

Septembre 1987

RESUME

A partir des seize années d'observation du Rio Mamore à la station de Guayaramerin située à l'exutoire d'un bassin de 590.000 km² sur l'un des deux principaux formateurs du Rio Madeira, nous avons étudié, au moyen de lois statistiques les modules et leur fréquence de retour, la variabilité des apports, annuelle et interannuelle, les débits moyens de certains mois et les débits caractéristiques à commencer par les maximums et minimums journaliers.

L'étude met en évidence une certaine régularité des modules qui, hormis pour l'année calendaire 1982 de période de retour estimée à cent ans, ne dépassent pas la fréquence décennale. Les modules, basés sur l'année hydrologique, de fréquence 50 ans sont estimés à 6500 et 11 500 m³/s.

Les variations saisonnières se traduisent par des hydrogrammes annuels quasi isomorphes dont la particularité de présenter une décrue plus rapide que la crue peut s'expliquer par l'influence de zones d'inondations amont. Les maximums, presque toujours observés en fin Avril-début Mai peuvent dépasser 23 000 m³/s (fréquence 50 ans). Les minimums, plus irréguliers dans le temps, généralement relevés entre mi-septembre et fin octobre, peuvent atteindre, pour la même période de retour, 900 m³/s.

Enfin est abordée l'étude du tarissement, des débits classés et des relations entre paramètres de débit, qui permettent, entre autres, de prévoir un mois à l'avance les débits maximums et minimums annuels.

MOTS CLES : Hydrologie - Débit - Module - Débits Mensuels - Etiage - Débit Maximum - Période de retour - Prévision débits - Mamore - Amazone - Guayaramerin

ABSTRACT

Based on observations over a period of sixteen years of the Mamore River at the Guayaramerin Station, which is situated at the outlet of a basin of 590,000 km² on one of the two principal rivers forming the Mamore River, we have studied statistically the mean annual discharges and their return frequency, yearly and inter-yearly variants in flow, the mean discharge of certain months and the characteristic discharge beginning with the daily maximum and minimum.

The study sets in evidence a certain regularity in mean annual discharges which, except for the 1982 year in a 100-years return period, do not exceed the 10-years frequency. The mean annual discharges based on the water year of fifty-years frequency are estimated to be 6,500 and 11,500 m³/second.

The seasonal variations are interpreted by yearly hydrographs, quasi isomorphous, whose characteristic of presenting a recession quicker than a flood may be explained by the influence of flooding zones upstream. The maximum, nearly always observed at the end of April - beginning of May, may exceed 23,000 m³/s (fifty-years frequency). The minimums, more irregular in intervals of time, generally more marked between mid-September and the end of October, may reach, for the same return period, 900 m³/s.

Finally the study of depletion is abarked upon, the discharges classified and the relation between discharge parameters, enabling us, among other things, to forecast one month in advance the annual maximum and minimum discharges.

KEYWORDS : Hydrology - Discharge - Mean monthly discharge - Minimum flow - Maximum instantaneous discharge - Return period - Forecasting discharge - Mamore - Amazon - Guayaramerin.

SOMMAIRE

Résumés	
1.	Modules annuels 1
1.1	Modules calculés sur l'année civile 2
1.2	Modules basés sur l'année hydrologique 4
2.	Variation saisonnière des débits 6
3.	Débits moyens mensuels de hautes et basses eaux 8
4.	Crues Maximales et étiages 10
4.1	Crues maximales 10
4.2	Etiage 13
5.	Tarissement 14
6.	Débits caractéristiques 16
7.	Relations entre les débits extrêmes et d'autres paramètres de débit 18
	Annexes : Tableaux et Figures 23
	Bibliographie 27

ETUDE DES DEBITS DU MAMORE A GUAYARAMERIN

Le bassin du Mamore à Guayaramerin couvre une superficie de 590.000 km² dont environ 16 % est situé sur le versant andin entre 5 500 et 500 mètres d'altitude ; le reste du bassin est constitué par une zone de plaines recouvertes de savanes et de forêts, et d'une partie du bouclier brésilien drainé par le principal affluent du Mamore, l'Itenez. En incluant le bassin du Parapeti, la surface drainée par l'Itenez à son embouchure est de 340.000 km² soit 58 % du bassin total. En dépit de cette superficie, bien supérieure à celle du Mamore avant la confluence, la contribution de l'Itenez aux apports du fleuve à Guayaramerin représente moins de 30 % des volumes écoulés.

Les observations effectuées par le PHICAB à la station de Guayaramerin n'ayant débuté qu'à la fin de l'année 1983, nous prendrons en considération les débits calculés à la station brésilienne située de l'autre côté du Mamore, pour la période de Novembre 1970 à Octobre 1983. Nous disposons ainsi jusqu'à Janvier 1987 de plus de 16 années complètes d'observation ce qui représente un échantillon suffisant pour en tirer quelques premiers résultats caractéristiques du débit à Guayaramerin.

Cette étude se limite intentionnellement à l'aspect débit du Mamoré à Guayaramerin, comme d'un paramètre indépendant, faisant abstraction du bassin versant et en particulier des relations hydro-pluviométriques. Cet aspect global sera abordé ultérieurement.

1. MODULES ANNUELS

A l'examen de la série des modules figurant sur le tableau 8 (Annexe) et représentée par l'histogramme de la figure 1, on constate une certaine stabilité des modules, tant pour l'année civile que pour l'année hydrologique jusqu'à 1981. Au delà, excepté l'année 1982 qui a une hydraulicité exceptionnelle, on semble être dans un cycle légèrement plus humide. Bien que, à priori, cette stabilité paraisse étonnante, en l'absence d'autres éléments de contrôle que la pluviométrie avec laquelle ces débits sont cohérents, nous nous fonderons sur ces données.

1.1 Modules calculés sur l'année civile

Au cours de ces seize années, le module varie de 7 390 à 11 400 m³/s, avec une moyenne qui s'établit à 8 530 m³/s ce qui représente un apport moyen annuel de 270.10⁹ m³. L'étude statistique de cet échantillon fournit les caractéristiques empiriques suivantes :

Médiane : 8 350 m³/s

Ecart type : 1 130 m³/s

Coefficient de variation : 0,133

Quartile inférieur : 7 560 m³/s

Quartile supérieur : 9 200 m³/s

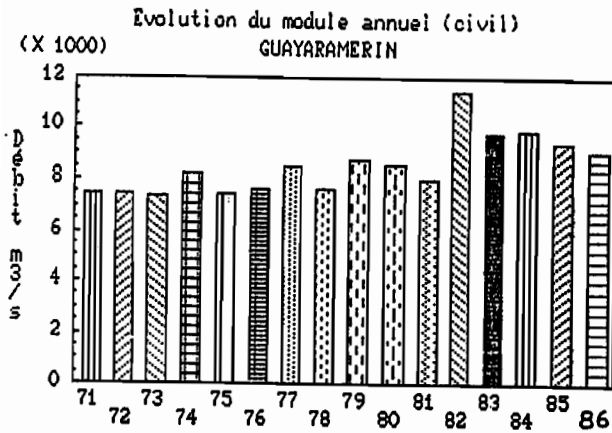


Fig. 1

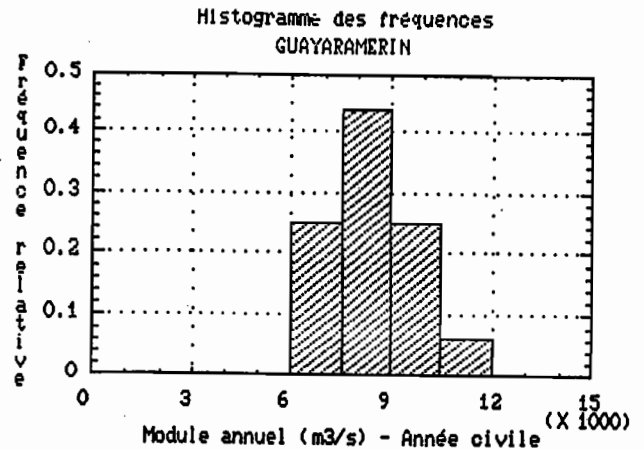


Fig. 2

L'histogramme des fréquences (Fig. 2) fait apparaître une symétrie relative qui présage d'une adéquation correcte à la loi normale.

Ainsi qu'on pouvait s'y attendre pour l'étude de modules, et comme le laissait deviner à priori l'abondance des apports, l'ajustement sur la loi de Gauss (Fig. 3) est le plus adéquat mais, bien qu'on ne puisse tester son adéquation à cause de la taille réduite de l'échantillon, on constate que les débits de basses eaux suivent mal l'ajustement, principalement à cause de la stabilité du débit des premières années déjà évoquée précédemment.

On peut en déduire les valeurs du module décennal sec et humide à Guayaramerin :

$$\bar{Q}_{0,9} = 7\ 080\ \text{m}^3/\text{s}$$

$$\bar{Q}_{0,1} = 9\ 980\ \text{m}^3/\text{s}$$

Ce qui permet de calculer le coefficient d'irrégularité, K3, défini par le rapport des modules décennaux de fréquence 0,1 et 0,9 :

$$K3 = 1,41$$

Bien que, analogue au coefficient de variation cité précédemment, on préfère souvent cette représentation plus concrète de l'irrégularité interannuelle.

De ces premiers résultats, on peut tirer les valeurs du débit spécifique correspondant aux modules :

- Module spécifique moyen : 14,5 l/s/km²
- Modules spécifiques de fréquence décennale : 12 l/s/km² en année sèche et 17 l/s/km² en année humide.

Comme il se doit, le module spécifique moyen est une moyenne des modules de l'Itenez et du Mamoré amont dont les régimes sont sensiblement différents. Pour la période de 1968 à 1982 on évalue ces modules à 7 l/s/km² pour l'Itenez et à 19 l/s/km² pour le Mamoré (Carlos Cruz- 1987).

Si, en dépit de la taille de l'échantillon on considère que la moyenne et la variance sont des variables aléatoires, on peut estimer, avec un intervalle de confiance à 95 % la moyenne et l'écart type à :

$$7\ 970\ \text{m}^3/\text{s} \leq \bar{Q} \leq 9\ 090\ \text{m}^3/\text{s}$$

$$740\ \text{m}^3/\text{s} \leq \sigma \leq 1\ 530\ \text{m}^3/\text{s}$$

De même pour les valeurs caractéristiques décennales, et avec le même intervalle de confiance, on aura

$$6\ 330\ \text{m}^3/\text{s} \leq \bar{Q}_{0,9} \leq 7\ 830\ \text{m}^3/\text{s}$$

pour les années sèches. Et pour les années pluvieuses :

$$9\ 230\ \text{m}^3/\text{s} \leq \bar{Q}_{0,1} \leq 10\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$$

Le module le plus faible observé, 7 390 m³/s en 1973, correspondrait à une période de retour moyenne de 1 année sur 6 et celle du plus fort module, 11 400 m³/s en 1982, à une période de retour moyenne de 100 ans.

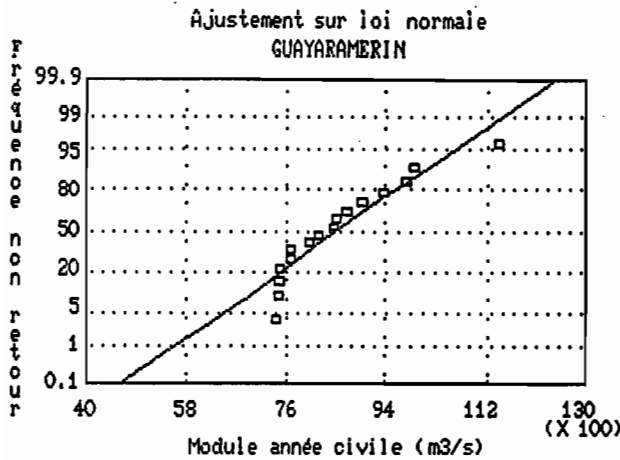


Fig. 3

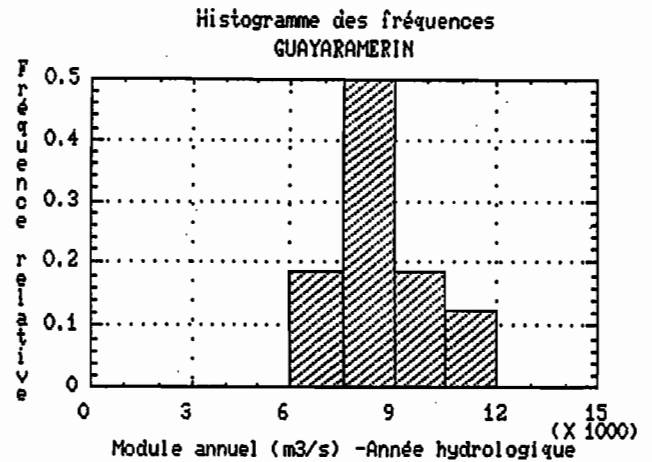


Fig. 4

1.2 Modules basés sur l'année hydrologique

Afin de mieux appréhender le cycle hydrologique annuel dans son ensemble, et de mieux représenter le paramètre physique qu'est le module, nous avons calculé les débits moyens sur l'année hydrologique, c'est à dire de Octobre à Septembre (Voir Tableau 8 en annexe).

L'histogramme des fréquences (Fig. 4) présente une silhouette légèrement asymétrique, moins proche d'une distribution gaussienne, mais l'histogramme (Fig. 5) des modules de 1970/71 à 1985/86 paraît "plus naturel" que celui des modules de l'année civile.

La période d'étude étant très peu différente (de Octobre 1970 à Octobre 1986), la moyenne reste quasiment inchangée : 8 520 m³/s. Les paramètres statistiques sont peu différents de ceux obtenus précédemment mais dénotent une dispersion légèrement plus forte des valeurs :

Médiane : 8 100 m³/s
 Ecart-type : 1 190 m³/s
 Coefficient de variation : 0,14

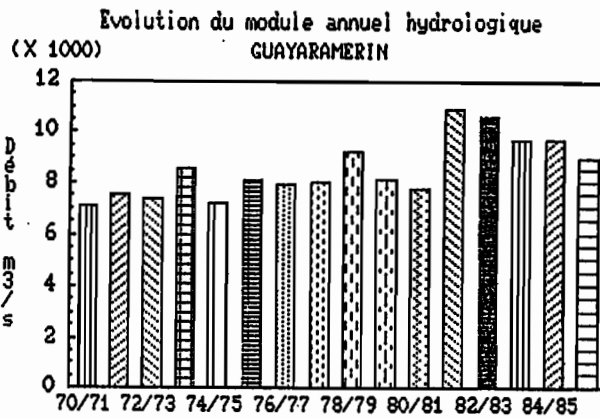


Fig. 5

Les modules minimums et maximums de la série sont de 7 030 et 10 900 m³/s. Bien que, par suite de la taille réduite de l'échantillon, on ne puisse calculer le test d'adéquation du chi², l'ajustement sur la loi normale paraît, au vu du graphique 6, satisfaisant ; en dépit de l'abondance et de la régularité des débits, qui militent davantage pour une distribution gaussienne, il s'avère que l'ajustement sur une loi de Galton paraît, dans le cas présent, meilleur (Fig. 7).

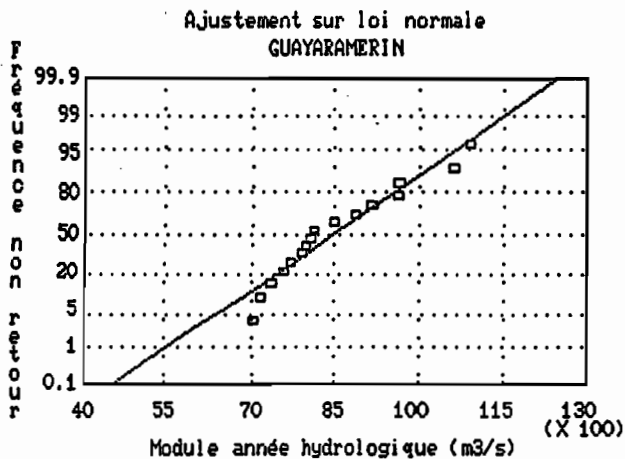


Fig. 6

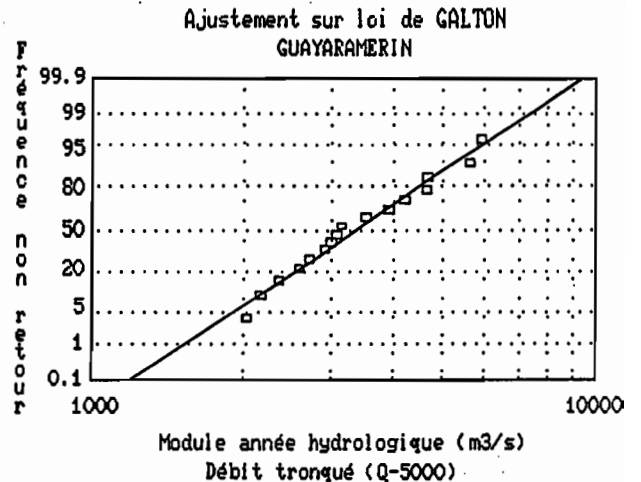


Fig. 7

Les valeurs des modules décennaux et cinquanteaux déduites de ces deux ajustements (Tableau 1) sont proches et du même ordre de grandeur que celles obtenues à partir du module de l'année civile.

Tableau 1 : Module de fréquence rare (m³/s)

: Fréquence	: Décennale		: Cinquantennale	
	: Sèche	: Humide	: Sèche	: Humide
: Loi de Gauss	: 7 000	: 10 000	: 6 100	: 11 000
: Loi de Galton	: 7 200	: 10 200	: 6 700	: 11 800

De ces valeurs, on déduit le coefficient d'irrégularité K3 :

$$K3 = 1,43$$

L'apport annuel correspondant à ces débits extrêmes peut ainsi varier de 200 à 360.10⁹ m³.

Les modules spécifiques correspondants à ces années ont pour valeur :

- tous les 10 ans : année sèche : 12 l/s/km²
année humide: 17 l/s/km²
- tous les 50 ans : année sèche : 10 à 11 l/s/km²
année humide: 19 à 20 l/s/km²

A l'examen de ces ajustements, on remarque que le choix du module "hydrologique", outre le fait qu'il représente une donnée plus "naturelle" qui n'est pas arbitrairement scindée au 1er Janvier comme pour l'année civile, satisfait mieux aux lois utilisées que le module civil.

Avant d'approfondir cette étude il conviendrait de mieux contrôler certains débits, en particulier durant la période de 1971 à 1973, à partir des données et des mesures originales faites par le Brésil, et de maximiser cette série sur la base des pluviométries antérieures à 1971.

2. VARIATION SAISONNIERE DES DEBITS

La modulation des débits au cours de l'année change peu d'une année à l'autre. Les hydrogrammes annuels présentent sensiblement le même profil, les minimums se situant en septembre ou octobre et les maximums entre le 15 Mars et le 31 Mai.

Hydrogramme moyen annuel

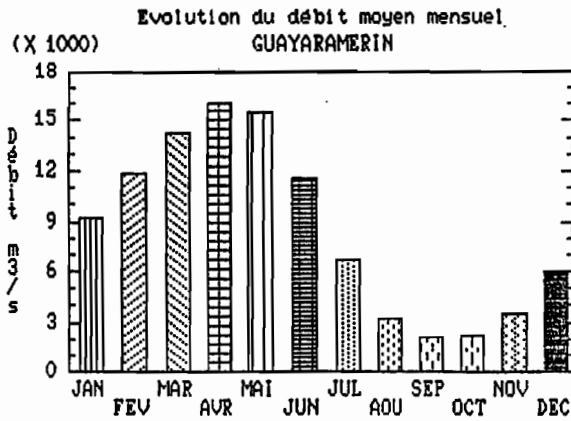


Fig. 8

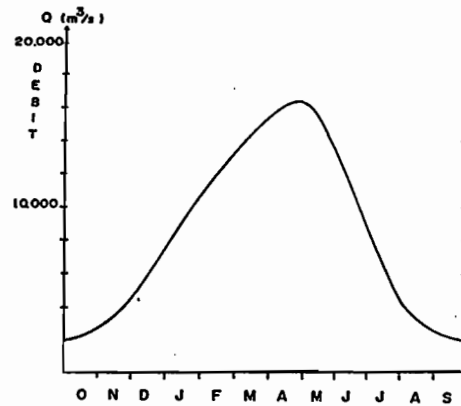


Fig. 9

L'hydrogramme annuel moyen découpe une forme très arrondie et régulière, comme on pouvait s'y attendre étant donné la taille du bassin. Il met en évidence une saison de hautes eaux d'environ 4 à 5 mois, culminant en Avril, saison qui apparaît encore plus nettement sur l'histogramme des débits moyens mensuels (Fig. 8). Les plus hautes eaux interviennent trois mois après le maximum pluviométrique mensuel observé sur l'ensemble du bassin en Janvier.

A l'examen, cet hydrogramme (Fig. 9) révèle une dissymétrie contraire à celle observée habituellement et qui se traduit par une montée des eaux étalée sur six mois alors que la période de décrue proprement dite ne dure que quatre mois et accuse une pente plus forte que celle de la crue.

Tableau 2 : Débits moyens mensuels (1970-1986)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Débit moyen	9160	11900	14200	16100	15500	11600	6710	3230	2110	2260	3460	5980

Le rapport 7,6 entre les débits moyens mensuels des mois extrêmes dénote une variation importante de ces débits au cours de l'année moyenne.

3. DEBITS MOYENS MENSUELS DE HAUTES ET BASSES EAUX

Si on s'intéresse aux débits moyens mensuels des mois de hautes eaux et d'étiage, on constate que dans le cas des hautes eaux, c'est-à-dire Avril et Mai, les caractéristiques (Voir Tableau 3) laissent prévoir un bon ajustement à la loi de Gauss, alors que dans le cas des mois d'étiage, Septembre et Octobre, elles tendraient plutôt vers une loi dissymétrique.

Tableau 3 : Caractéristiques des débits mensuels remarquables (m^3/s) (1970-1986)

Mois	Avril	Mai	Septembre	Octobre
Moyenne	16 050	15 500	2 110	2 260
Médiane	15 650	15 850	1 930	2 260
Ecart-type	2 360	3 300	750	890
Coefficient de variation	0,15	0,21	0,36	0,39
Minimum	12 900	10 200	1 250	1 120
Maximum	21 200	21 700	3 650	4 450

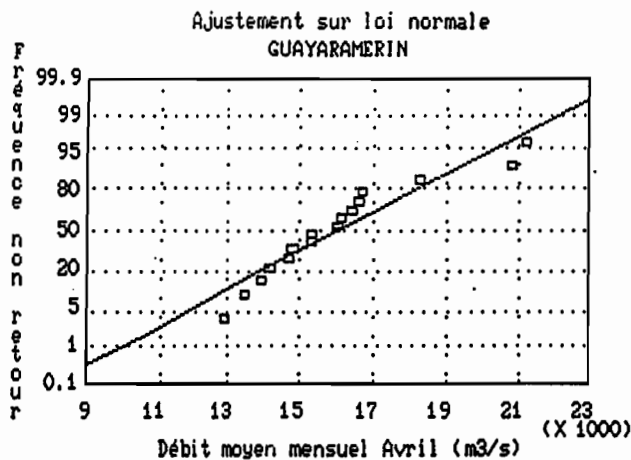


Fig. 10

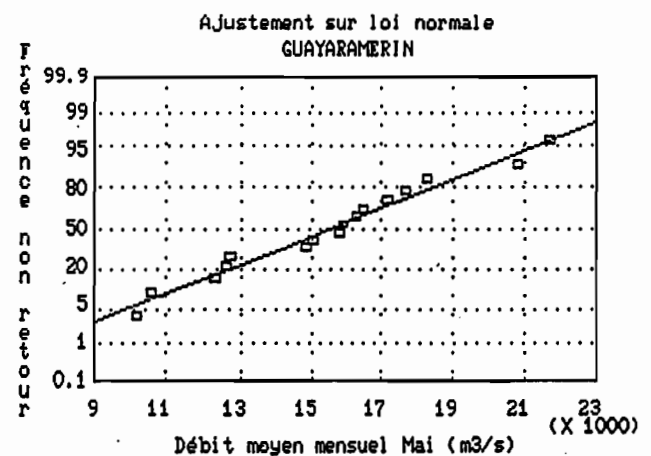


Fig. 11

Comme le laissait supposer l'étude statistique, et comme le confirment les graphiques 10 et 11, l'ajustement sur la loi normale est assez bien adapté aux débits des mois de hautes eaux, en particulier au mois de Mai.

A l'inverse, cette loi s'ajuste mal aux débits des mois d'étiage (forte concavité en particulier aux très faibles débits) pour lesquels la loi de Galton se révèle mieux adaptée (Voir Fig. 12 et 13) en choisissant un débit tronqué : $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ en Septembre et $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ en Octobre.

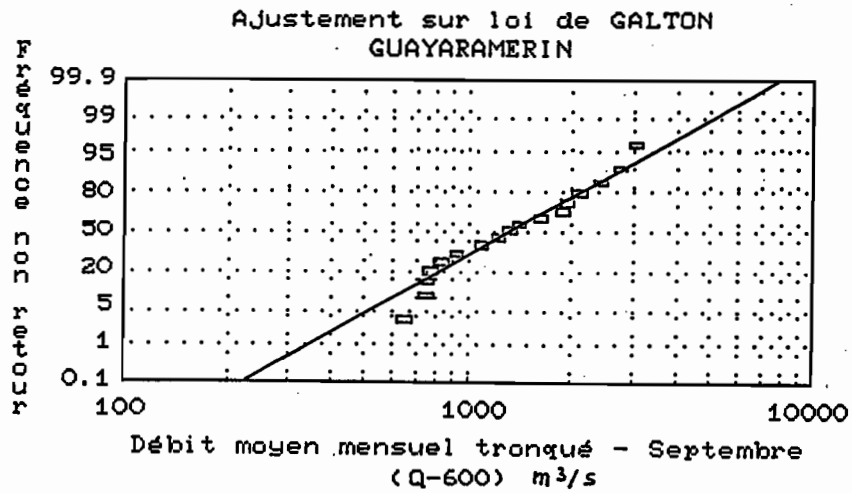


Fig. 12

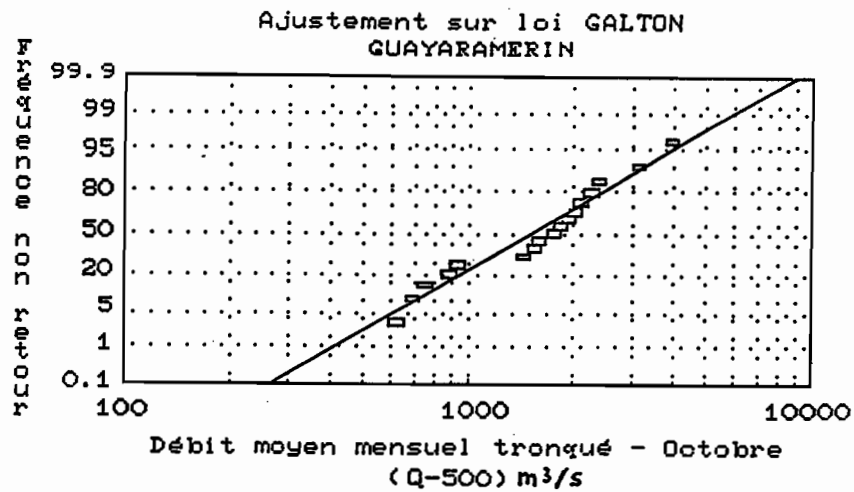


Fig. 13

On peut en déduire les caractéristiques suivantes ; pour les années pluvieuses :

	Avril	Mai
Débit moy. mensuel décennal humide	19 100 m ³ /s	19 700 m ³ /s

et pour les années sèches :

	Septembre	Octobre
Débit moy. mensuel décennal sec	1 230 m ³ /s	1 240 m ³ /s

4. CRUES MAXIMALES ET ETIAGES

4.1 Crues maximales

Afin de déterminer l'importance et la fréquence des crues dans cette région où les inondations causent de graves dommages, nous nous intéresserons aux débits maximums journaliers annuels. Etant donné la lenteur de la variation des débits dans le temps, cette valeur est assimilable au débit maximum instantané. Les valeurs observées sont rassemblées dans le tableau 9 en annexe.

Le tableau 4 fournit pour l'échantillon analysé, les périodes de passage du maximum de la crue annuelle ; on en déduit que, au cours de ces 16 années, 7 fois sur 10 le maximum de la crue a atteint Guayaramerin entre le 15 Avril et le 15 Mai.

Tableau 4 : Période d'apparition du débit maximum

Période	Fréquence observée
15/03 au 31/03	1
01/04 au 14/04	2
15/04 au 30/04	6
01/05 au 14/05	5
15/05 au 31/05	2

Si l'on étudie la fréquence d'apparition du maximum annuel par décade (Fig. 14) on remarque que la période la plus probable est la dernière décade du mois d'Avril, puis la première du mois de Mai.

Fréquence d'apparition du maximum annuel

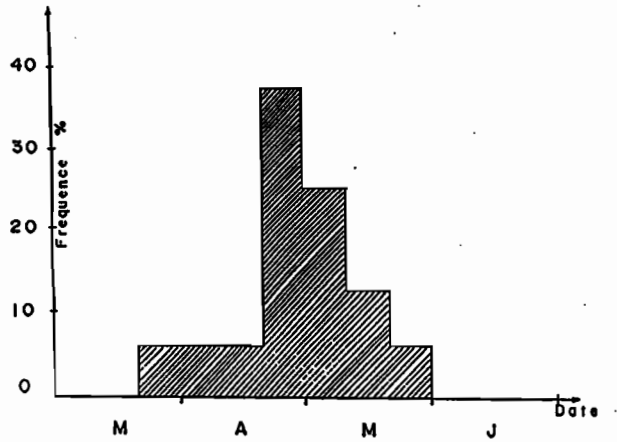


Fig. 14

L'étude statistique de ces débits fournit les paramètres rassemblés dans le tableau 5 (page 12). On remarque que la dispersion est faible et que, comme pour toutes les périodes de débit abondant, la loi normale s'ajuste parfaitement (Fig. 15).

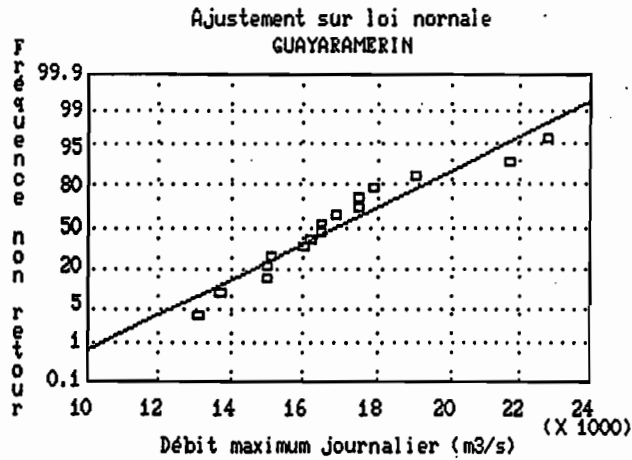


Fig. 15

On peut en déduire les débits maximums pour une récurrence donnée ; le débit de fréquence décennale, avec un intervalle de confiance à 90 %, sera estimé à :

$$18\ 800\ \text{m}^3 \leq Q_{x0,1} \leq 21\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$$

et le débit maximum de période de retour moyenne de 1 année sur 50 environ, avec le même intervalle de confiance, se situera :

$$20\ 800\ \text{m}^3/\text{s} \leq Q_{x0,02} \leq 23\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$$

Les cotes à l'échelle correspondant à ces débits se situent entre 10,5 et 11,5 mètres à l'échelle PHICAB, et de 13 à 14 mètres sur l'échelle brésilienne.

Les débits spécifiques correspondant à ces récurrences sont de 34 et 38 l/s/km².

Tableau 5 : Débits maximum et minimum annuels (m³/s) observés sur la période 1970-1986.

Caractéristiques	Débit maximal : Q _x (16 ans)	Débit minimal : Q _{n20} (17 ans)
Moyenne	16 900	1 700
Médiane	16 500	1 720
Ecart-type	2 590	520
Coefficient de variation	0,15	0,31
Minimum	13 100	1 050
Maximum	22 800	2 760

4.2 Etiage

Dans le cas des débits d'étiage, afin de mieux représenter la période de basses eaux et aussi de minimiser les erreurs ou les interprétations de l'observateur, on choisira comme paramètre la moyenne des débits journaliers des 20 jours les plus faibles de l'année : $Q_n 20$.

L'étude de ces débits, bien qu'à un titre différent de celles des maximums, intéresse aussi les riverains et les organismes de navigation dans cette région où le fleuve demeure le seul moyen de communication.

Les valeurs des étiages absolus annuels et de $Q_n 20$ durant les dix-sept années d'observation sont rassemblées dans le tableau 9 en annexe.

La Figure 16 donne un aperçu des périodes auxquelles ont été observés ces minimums durant les dix-sept dernières années. On constate que, dans 83 % des cas, le minimum a été relevé au cours de la période comprise entre le 15 septembre et le 30 octobre.

Fréquence d'apparition du minimum annuel

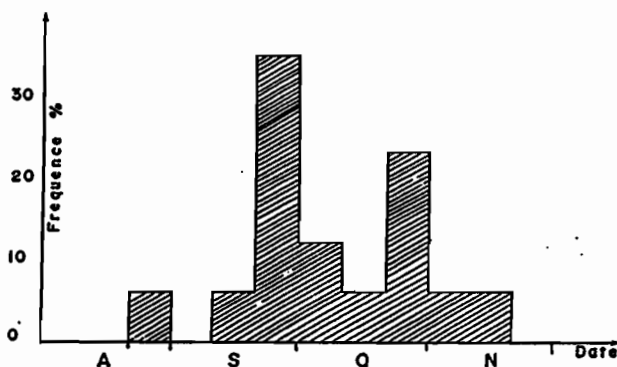
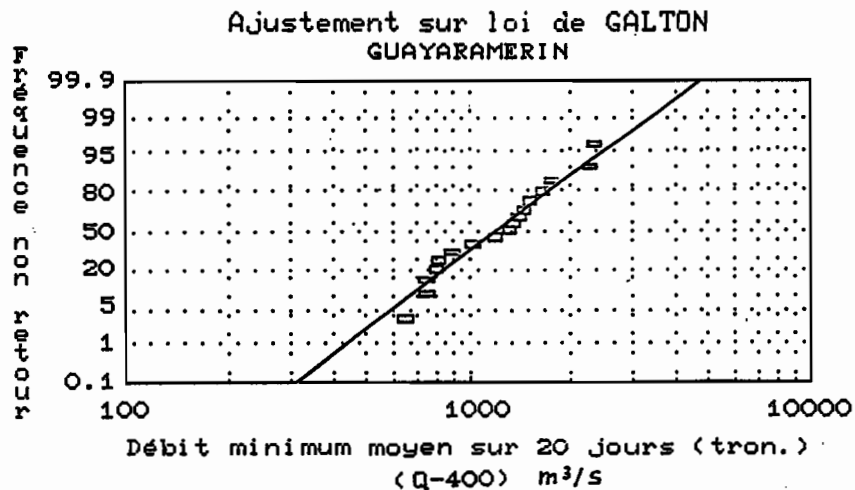


Fig. 16

Au contraire des débits maximums, les dates des étiages semblent plus dispersées dans le temps, et seules trois décades semblent plus favorables.

L'étude statistique de ces débits fournit les caractéristiques déjà mentionnées dans le tableau 5 (page 12). La dispersion des valeurs bien que moins grande que dans le cas des débits mensuels de basses eaux laisse indécis sur le choix de l'ajustement. Le pointage sur un diagramme de Gauss fait apparaître une concavité révélatrice d'une loi hypogaussique.



L'ajustement sur une loi de Galton (Fig. 17) à partir des débits corrigés, semble être le plus adéquat et permet de calculer les valeurs des débits moyens minimums sur 20 jours, pour deux récurrences choisies :

- tous les 10 ans : $Q_n 20 = 1\ 100\ m^3/s$
- tous les 50 ans : $Q_n 20 = 900\ m^3/s$

correspondant à des débits spécifiques de 1,9 à 1,5 l/s/km².

Excepté cinq années où l'écart entre l'étiage absolu annuel et $Q_n 20$ est supérieur à 10 %, atteignant même 15 % en 1982, ces deux paramètres sont assez proches : le rapport $Q_n/Q_n 20$ oscille autour de 0,92.

L'étiage absolu le plus sévère enregistré au cours des 17 saisons observées a atteint 980 m³/s en octobre 1974 et correspond à un $Q_n 20$ de 1 050 m³/s.

5. TARISSEMENT

Nous avons déjà vu que, après le maximum atteint en Avril-Mai, le débit décroît régulièrement jusqu'en Septembre, alimenté à partir de juillet par la vidange des nappes et des zones inondables, et par les apports des derniers mois qui continuent de parvenir de la partie amont du bassin. A cet écoulement peut s'ajouter l'influence de quelques pluies sporadiques sur le bassin inférieur.

Dès septembre commencent à se greffer sur cette décrue les crues "locales" consécutives aux premières précipitations qui affectent la partie aval du bassin et qui se traduisent sur l'hydrogramme par une succession d'ondulations.

Bien qu'on ne puisse donc pas parler de tarissement pur puisqu'il ne s'agit pas uniquement de vidange d'aquifères, il peut être intéressant d'étudier le tarissement réel.

Si nous adoptons la formulation exponentielle du débit, généralement reconnue dans ce cas,

$$q = q_0 e^{-\alpha(t-t_0)}$$

nous constatons que le coefficient α déterminé à partir des hydrogrammes, varie sensiblement d'une année à l'autre. Il convient de préciser que ce coefficient est calculé à partir d'un tarissement "idéal" obtenu en éliminant les crues parasites qui interfèrent sur la décrue.

On notera, en outre, que ce coefficient diminue avec le débit ce qui paraît logique étant donné l'hétérogénéité du bassin.

Les coefficients sont calculés pour la première partie du tarissement pour des débits supérieurs à 6000 m³/s. Dans la partie inférieure il est difficile de tracer le tarissement pur étant donné le nombre de crues qui viennent le perturber. A peine arrive-t-on à estimer certaines années la valeur de α qui pour un débit de l'ordre de 1000 à 1500 m³/s est d'environ 0,012 (Fig. 18).

Variation du coefficient de tarissement

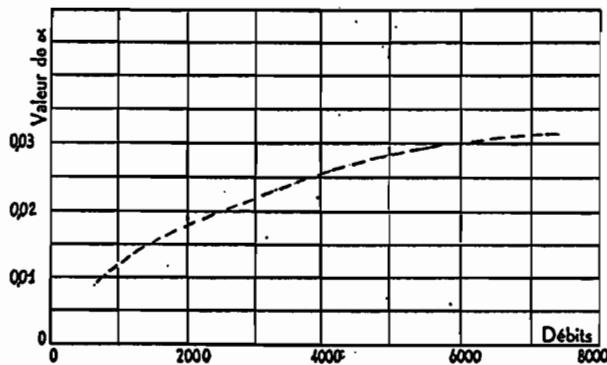


Fig. 18

La détermination de α n'est pas suffisamment rigoureuse pour permettre d'envisager une corrélation avec d'autres paramètres, d'autant que l'examen des valeurs de α ne semble pas esquisser l'influence d'un facteur quelconque. Tout au plus peut-on constater que α est minimum lorsque le module est le plus élevé (1982) et que de 1971 à 1981, ou les modules, à l'exception de 1979, sont compris entre 7000 et 8500 m³/s, la valeur moyenne de α est de 0,032 alors que de 1982 à 1986 où les modules sont compris entre 9000 et 11000 m³/s, la valeur moyenne de α est de 0,026. L'année 1983 pour laquelle une crue importante vient perturber la décrue n'est pas prise en considération.

Néanmoins ces données permettent de tracer une courbe type de tarissement idéal à partir d'un débit fictif au premier juillet choisi arbitrairement égal au débit moyen : 9100 m³/s (Voir Fig. 19 tracés en pointillés).

Courbes de tarissement

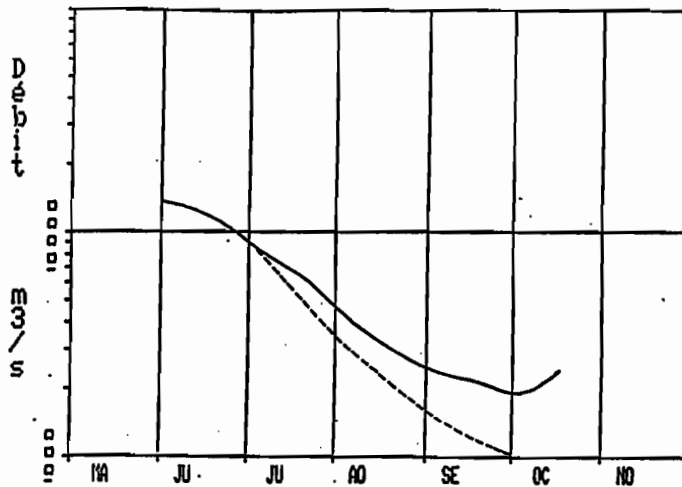


Fig. 19

Sur le même graphique nous avons représenté, en trait plein, la courbe moyenne de décrue tirée des seize années étudiées, en considérant le débit réellement observé, avec ou sans crue parasite.

La différence entre les deux courbes représente les apports des crues de saison sèche.

6. DEBITS CARACTERISTIQUES

Il peut être intéressant dans certains cas de connaître les valeurs des débits caractéristiques qui sont les débits dépassés pendant un certain nombre de jours ou de mois dans l'année. Ces

valeurs, tirées de la courbe des débits classés de chaque année, ne représentent pas une période continue, mais un nombre donné de jours consécutifs ou non. Afin d'être certain de traiter le maximum et le minimum correspondants dans la même année, nous prendrons comme base de calcul l'année calendaire. Ces données sont utiles dans le cas de seuils de navigation, par exemple, ou pour la gestion des retenues.

En dehors des débits extrêmes, déjà étudiés, on peut s'intéresser à cinq débits caractéristiques correspondant à des périodes de 1 mois, 3 mois, 6 mois, 9 mois, et 11 mois. Les paramètres statistiques de ces débits durant la période 1971-1986 sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Débits caractéristiques (m^3/s).

	Moyenne	Médiane	Coeff.irrég.	Ecart-type
DC 11	1960	1960	0,35	690
DC 9	3240	3120	0,29	940
DC 6	8070	7840	0,18	1480
DC 3	13400	13600	0,10	1400
DC 1	16400	16100	0,15	2410

L'ajustement sur la loi de Gauss sera, d'évidence, meilleur pour les débits élevés, DC 3 en particulier, que pour les débits faibles, DC 11, qui se rapprochent davantage des débits d'étiage et donc de la loi de Galton. Il faut souligner la dispersion plus forte des débits lorsqu'on se rapproche des extrêmes qui se traduit par une croissance du coefficient d'irrégularité pour DC 1 et DC 11 alors qu'il est minimum pour DC 3 (Fig. 20).

On ne représentera pas les ajustements aux lois de Gauss et gaussio-log pour chacun des débits caractéristiques, mais seulement pour DC 3 et DC 9 (Fig. en annexe).

Variation du coefficient d'irrégularité

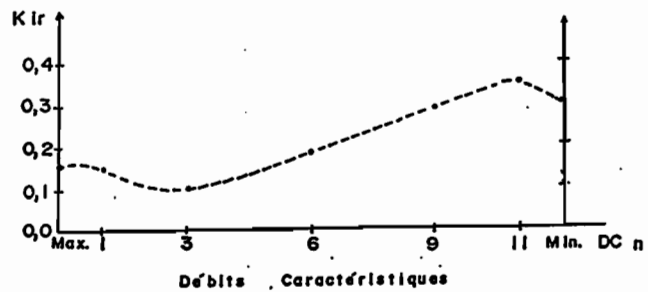


Fig. 20

De ces observations, on peut tirer les valeurs de récurrence décennale et cinquantennale correspondants ainsi que l'erreur sur ces débits pour un intervalle de confiance à 90 % (Tableau 7).

Tableau 7 : Débits caractéristiques de récurrence donnée (m³/s)

	Débit décennal			Débit cinquantenal		
	Humide	Sec	Int. Conf. 90 %	Humide	Sec	Int. Conf. 90 %
DC 11	2850	1100	± 380	3400	550	± 500
DC 9	4400	2050	± 520	5200	1300	± 680
DC 6	10000	6200	± 820	11100	5000	± 1080
DC 3	15200	11600	± 780	16300	10500	± 1010
DC 1	19500	13300	± 1340	21300	11400	± 1750

7. RELATIONS ENTRE LES DÉBITS EXTREMES ET LES AUTRES PARAMÈTRES DE DÉBIT

A partir de tous ces différents paramètres qui déterminent le régime hydrologique, il peut être intéressant d'établir des comparaisons soit pour mettre en évidence certains facteurs, soit pour prévoir certains débits. Nous nous baserons pour établir ces

relations sur les seize années complètes, civiles ou hydrologiques, dont nous disposons.

Ainsi, nous allons comparer les débits maximums successivement au DC 3, au module de l'année hydrologique et à un débit à une date déterminée.

La première corrélation exprimée sur la Fig. 21 est excellente; son coefficient de corrélation est : 0,87. Mais elle ne fait que confirmer la bonne relation existant entre le débit maximum de l'année et celui des 90 jours les plus abondants. Etant donné la régularité des débits, cette constatation s'explique parfaitement.

Pour cette corrélation comme pour toutes les suivantes figurent sur les graphiques, outre la droite de corrélation, les limites de l'intervalle de confiance à 95 %.

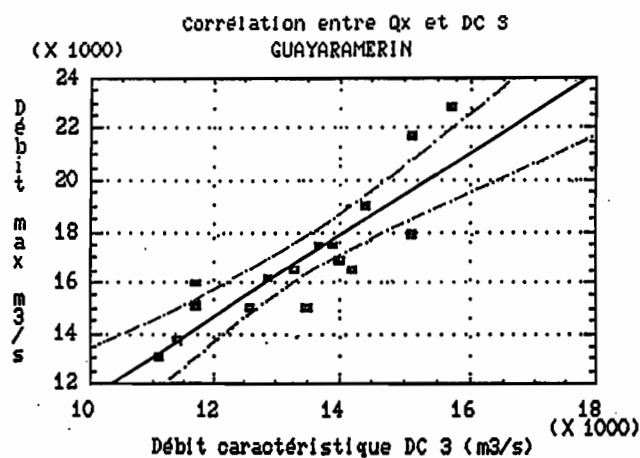


Fig. 21

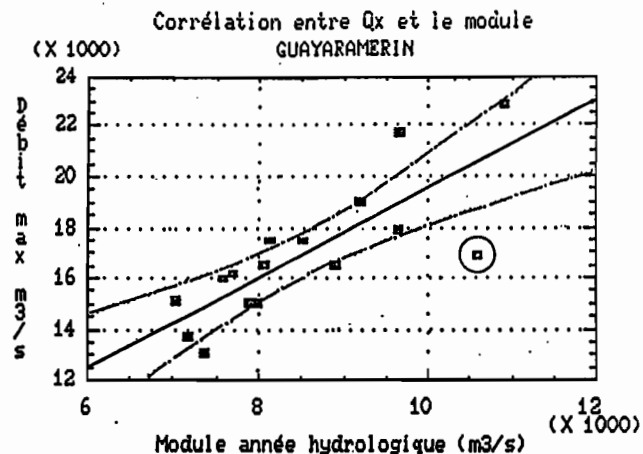


Fig. 22

La deuxième corrélation établit un rapport entre le débit maximum et le module de l'année hydrologique (Fig. 22). Cette corrélation est encore bonne, puisque pour les seize années nous obtenons un coefficient de 0,80 qui pourrait atteindre 0,90 si on excluait l'année 1982/1983 (Point encerclé sur la fig. 22). On en déduit l'équation :

$$Q_x = 1,742 Q + 2066$$

L'interprétation physique de cette bonne relation réside dans la forme de l'hydrogramme qui varie très peu d'une année à l'autre, et dans le "retour à l'état initial" que l'on observe lors de chaque étiage. Il y a donc une certaine proportionnalité entre le module et le débit maximum excepté lorsque la forme de

l'hydrogramme change ce qui est le cas en 1983 où la crue est beaucoup plus aplatie et présente une deuxième onde de crue qui vient se superposer à l'onde principale lors de sa décrue. Sur la Fig. 23 on a matérialisé la séparation de deux crues. Si on se limite à l'onde principale, le module s'en trouve diminué de 800 m³/s et la corrélation s'améliore sensiblement avec un coefficient de 0,86 (Voir Fig. 24). La droite de corrélation a, dans ce cas, pour équation :

$$Q_x = 2,003 Q - 54$$

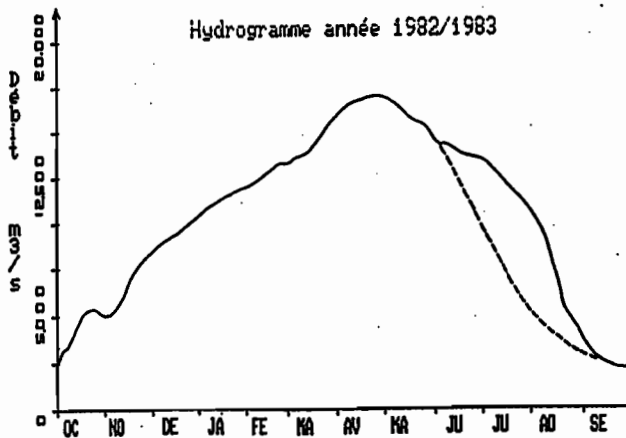


Fig. 23

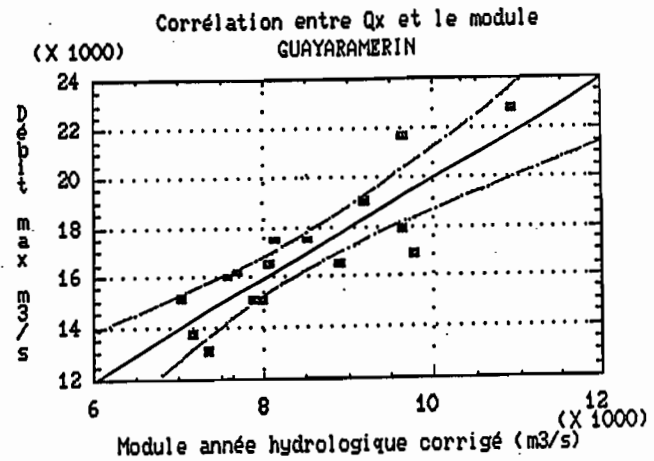


Fig. 24

Enfin nous avons tenté d'établir une relation entre le débit maximum et le débit d'un mois précédent, ou à une date antérieure.

La meilleure corrélation ainsi mise en évidence est établie entre le débit maximum et le débit moyen journalier à la date du 31 Mars, c'est à dire environ un mois avant la période la plus probable d'apparition de ce maximum. Le coefficient de 0,92 dénote une excellente corrélation (Fig. 25) dont la droite s'exprime sous la forme :

$$Q_x = 1,404 Q_{31/03} - 4531$$

De même concernant les débits minimums déjà étudiés, il est possible d'établir des relations entre ce paramètre et le débit caractéristique dépassé pendant neuf mois, DC 9, ainsi qu'avec le débit à la date du 31 Août. La corrélation avec DC 11 ne présente aucun intérêt puisque ces deux paramètres sont pratiquement égaux.

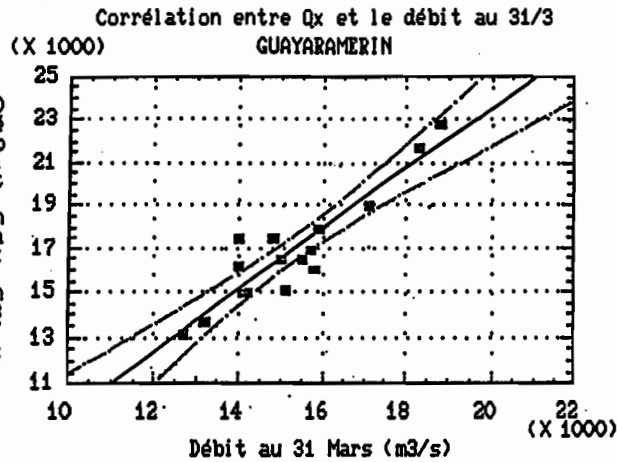


Fig. 25

La relation entre le débit moyen d'étiage, $Q_n 20$, et DC 9 est bonne : $K = 0,80$. Elle serait supérieure sans l'année 1986 qui se situe nettement en dehors du nuage (Fig. 26 - point encadré) à cause d'une importante crue parasite qui intervient durant tout le mois d'Octobre.

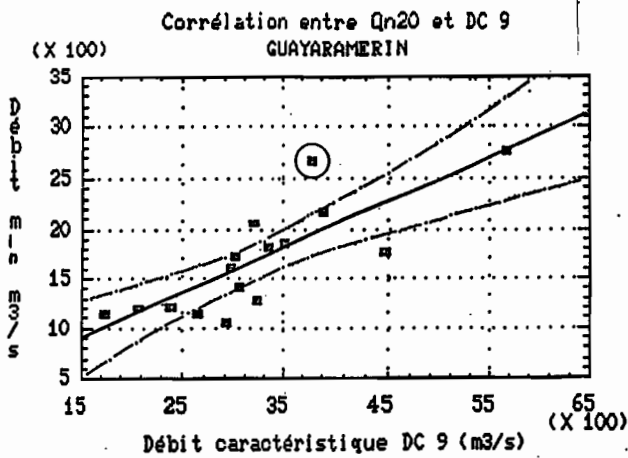


Fig. 26

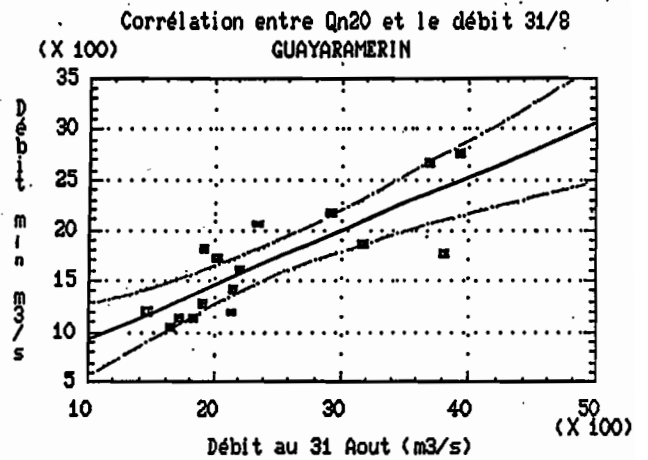


Fig. 27

A l'inverse la corrélation avec le débit moyen du mois d'Août ou le débit à la date du 15 Août est mauvaise ; seul apparaît représentatif comme paramètre le débit à la date du 31 Août (Fig. 27), soit donc un mois environ avant la date probable d'apparition. Le coefficient de corrélation obtenu est de 0,82 et l'équation de la droite s'écrit :

$$Q_n 20 = 0,537 Q_{31/08} + 378$$

Il aurait été, certes, plus rationnel d'examiner les corrélations interstations avec les six autres stations situées à l'amont, de s'attacher aux relations hydro-pluviométriques, d'étudier l'influence des facteurs physiques et du facteur échelle sur l'ensemble du bassin versant. Ce n'est pas le but de cette étude.

Ces résultats n'ont d'autres prétentions que de fournir dès à présent quelques données à ceux qui s'intéressent à ce cordon ombilical de l'Amazonie bolivienne. Ils ne prétendent en rien constituer une étude approfondie qui, elle, devra faire l'objet de publications prochaines, englobant l'étude de l'ensemble du bassin du Mamore.

- Annexe-

Tableau 8

Modules annuels

sur l'année civile		sur l'année hydrologique	
Année	Module (m ³ /s)	Année	Module (m ³ /s)
1971	7 460	1970/1971	7 030
1972	7 450	1971/1972	7 570
1973	7 390	1972/1973	7 350
1974	8 200	1973/1974	8 510
1975	7 430	1974/1975	7 160
1976	7 670	1975/1976	8 060
1977	8 490	1976/1977	7 890
1978	7 660	1977/1978	7 980
1979	8 730	1978/1979	9 190
1980	8 530	1979/1980	8 130
1981	8 020	1980/1981	7 690
1982	11 400	1981/1982	10 900
1983	9 760	1982/1983	10 600
1984	9 890	1983/1984	9 650
1985	9 390	1984/1985	9 640
1986	9 010	1985/1986	8 900
Moyenne	8 530	Moyenne	8 520

TABLEAU 9

Débits maximums et minimums. Valeurs et dates d'apparition

Année	Qx	Date	Durée	Qn	Date	Durée	Qn 20
1970	-	-	-	1880	23/09	3 j	1930
1971	15 100	1/4	2 j	2030	1/10	2 j	2060
1972	16 000	25/3	10 j	1550	25/08	2 j	1720
1973	13 100	5/5	1 j	1290	14/10	1 j	1430
1974	17 500	27/4	4 j	980	4/10	1 j	1050
1975	13 700	13/4	4 j	1390	19/9	1 j	1600
1976	16 500	29/4	1 j	1080	25/10	1 j	1200
1977	15 000	17/5	1 j	1630	23/9	1 j	1810
1978	15 000	20/4	5 j	1160	26/09	3 j	1210
1979	19 000	5/5	4 j	1110	7/11	1 j	1150
1980	17 500	21/5	3 j	1770	8/10	2 j	1860
1981	16 200	4/5	10 j	1150	21/9	1 j	1290
1982	22 800	27/4	9 j	2360	22/9	1 j	2760
1983	16 900	23/4	7 j	1530	21/10	1 j	1760
1984	21 700	26/4	10 j	1110	21/10	2 j	1150
1985	17 900	7/5	8 j	2030	26/10	1 j	2160
1986	16 500	14/5	3 j	2380	16/11	1 j	2680

Tableau 10

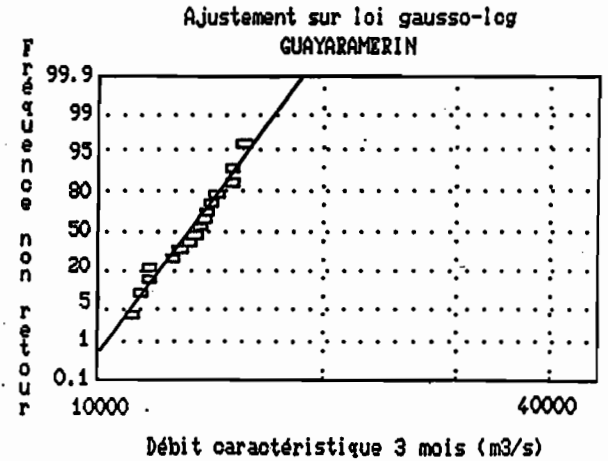
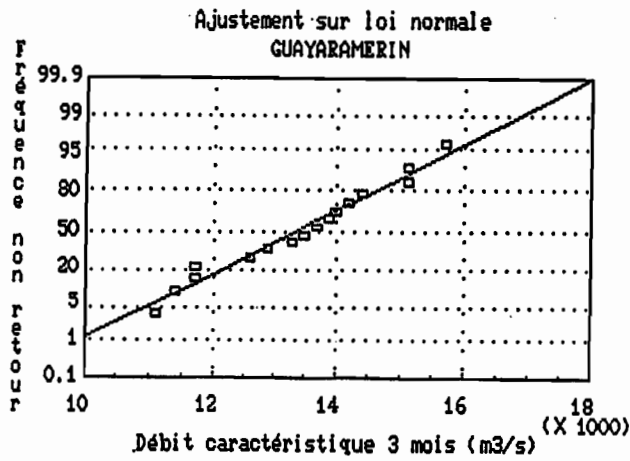
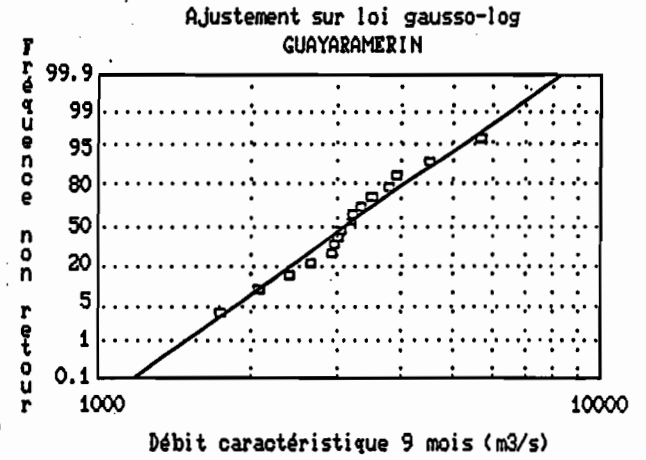
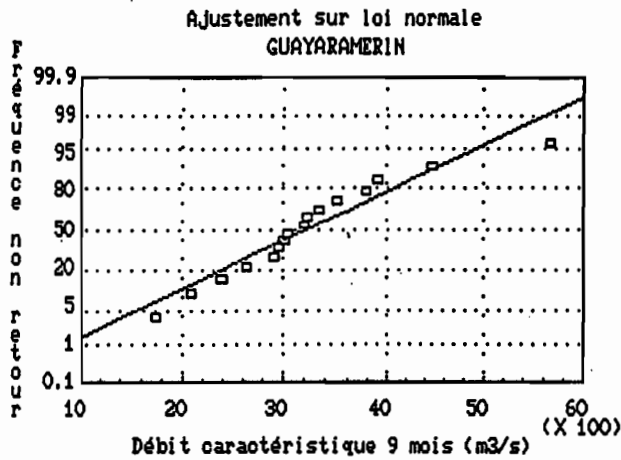
Valeurs du coefficient de tarissement

Année	α
1971	0,020
1972	0,024
1973	0,030
1974	0,032
1975	0,030
1976	0,035
1977	0,030
1978	0,036
1979	0,035
1980	0,039
1981	0,041
1982	0,021
1983	0,043*
1984	0,027
1985	0,029
1986	0,027

* Crue secondaire importante lors de la décrue.

- Annexe -

Ajustement des débits caractéristiques de 9 et 3 mois



PHICAB

LISTE DE TRAVAUX

1987

- ABASTO N (1987). Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Madre de Dios, Amazonía, Bolivia, Perú. PHICAB : CONAPHI-IHH-ORSTOM, Tesis UMSA, 295 p.
- ABASTO N, HOORELBECKE R, ROCHE MA, et al (1985). Características y calibración de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 120 p.
- ABASTO N, HOORELBECKE R, ROCHE MA, RUBIN DE CELIS L (1985). Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrogramas de la red hidrométrica PHICAB en la cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 70 p.
- APOTEKER A, ROCHE MA, RUBIN DE CELIS L (1985). Programas informáticos para el procesamiento de datos de conductividad de agua, PHICABC. Goupil 3 Flex 9 Basic 8" ploter. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 21 p.
- BOURGES J (1987). Aperçu sur les débits du Mamoré à Guayaramerin. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 11 p.
- CHAVEZ GA (1987). Generación de crecidas en la cuenca del Río Ichilo en base al modelo matemático HUIG, Amazonía, Bolivia. PHICAB: CONAPHI-IHH-ORSTOM, Tesis UMSA, 276 p.
- CRUZ C (1987). Balance hidrico superficial de la Cuenca del Río Itenez, Amazonía, Bolivia, Brasil. PHICAB: CONAPHI-IHH-ORSTOM, Tesis UMSA, 218 p.
- ESPINOZA OF (1985). Balance hidrico superficial de la cuenca del Rio Beni. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI, Tesis UMSA, 181 p.
- FERNANDEZ JAUREGUI CA, ROCHE MA, ALIAGA A, PEÑA J (1987). Los recursos hidricos en Bolivia. PHICAB: CONAPHI-IHH-ORSTOM, 20 p.
- GARCIA WA (1985). Balance hidrico superficial de la cuenca del Río Mamoré. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI Tesis UMSA, 110 p.
- GOUZE PH, FERHI A, FONTES J-CH, ROCHE MA, (1987). Composition isotopique (18O) de la matière organique des tourbières actuelles et holocènes en Bolivie. Résultats préliminaires et perspectives d'application en paléoclimatologie. Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats", ORSTOM, Bondy, 29-30.

- GUYOT JL, CALLE H, CALLE M, QUINTANILLA J (1987). Résultats d'une campagne d'échantillonnage en basses eaux en Amazonie bolivienne, en août-septembre 1986. PHICAB: IIQ-ORSTOM-SENAMHI.
- GUZMAN WD, ROCHE MA (1985). Programas de análisis pluviométricos (consistencia de datos mensuales para 50 estaciones, hietógramas mensuales de series de 30 años, análisis mensuales de la estación seca y húmeda para series mensuales de 30 años). Flex 9 BASIC GOUPIL 8" ploter. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI, 24 p.
- HERBAS C (1987). Climatología de la cuenca andina y amazónica del Río Grande, Bolivia. PHICAB: CONAPHI-IHH-ORSTOM, Tesis UMSA, 240 p.
- LOZADA GA (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Titicaca. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI. Tesis UMSA, 158 p.
- MARIACA JJ (1985). Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Poopó y los salares de Uyuni y Coipasa-Bolivia. PHICAB: IHH-ORSTOM-SENAMHI. Tesis UMSA, 203 p.
- ROCHE MA (1982). Les conditions d'une étude hydrologique en Amazonie Bolivienne. PHICAB: ORSTOM, 31 p.
- ROCHE MA, CANEDO M (1984). Programa Hidrológico y Climatológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia. Plaquette de présentation du PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, Folleto 4 p.
- ROCHE MA, ROCHA N (1985). Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4 000 000. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las salinidades iónicas de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB: LHM-ORSTOM-SENAMHI, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las concentraciones en aniones de los ríos de la Cuenca Amazónica de Bolivia. PHICAB: LHM-ORSTOM-SENAMHI, 1 hoja offset.
- ROCHE MA, ABASTO N, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Mapa de las concentraciones en cationes de los ríos de la Cuenca amazónica de Bolivia. PHICAB: LHM-ORSTOM-SENAMHI, 1 hoja offset.

- ROCHE MA, FERNANDEZ JAUREGUI C, APOTEKER A, ABASTO N, CALLE H, TOLEDE M, CORDIER JP, POINTILLART C (1986). Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. PHICAB: IHH-LHM-ORSTOM-SENAMHI, 257 p.
- ROCHE MA, FERNANDEZ JAUREGUI C, RONCHAIL J, BOURGES J, GUYOT JL (1986). Participación del PHICAB al simposio de la investigación francesa en Bolivia. PHICAB: AASANA-IFEA-IBTEN-IHH-ORSTOM-SENAMHI, 35 p.
- ROCHE MA, FERNANDEZ JAUREGUI C (1987). Ressources hydriques, salinités et exportations salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. PHICAB: ORSTOM-IHH-CONAPHI, 30 p.
- ROCHE MA, FERNANDEZ JAUREGUI C (1987). Water Resources, Salinity and Salt Exportations of the Rivers of the Bolivian Amazon. Submitted to Journal of Hydrology. Elsevier. Amsterdam. (PHICAB).
- RONCHAIL J (1985). Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie (Situations météorologiques - Analyses de séries climatiques - Inventaire de saisons exceptionnelles). PHICAB: AASANA-IFEA-ORSTOM-SENAMHI, 60 p.
- RONCHAIL J (1985). Relations de saisons remarquables avec la structure de l'atmosphère et les situations météorologiques sur l'Altiplano péruano-bolivien. PHICAB: AASANA-IFEA-ORSTOM-SENAMHI, 38 p.
- RONCHAIL J (1986). Variations climatiques hivernales à Santa Cruz de la Sierra. Amazonie bolivienne. PHICAB: AASANA-IFEA-ORSTOM-SENAMHI. Communication au Symposium Ecologique-Impacto del Desarrollo en la Ecología del Trópico Boliviano, Santa Cruz 1986, 16 p.
- RONCHAIL J (1986). Situations atmosphériques et précipitations comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie - Bolivie. PHICAB: AASANA-IFEA-ORSTOM-SENAMHI, 36 p.
- RONCHAIL J (1986). Situations atmosphériques et températures comparées sur l'Altiplano et l'Amazonie - Bolivie. PHICAB: AASANA-IFEA-ORSTOM-SENAMHI.
- RUBIN DE CELIS L, ROCHE MA (1985). Programas informáticos para el procesamiento de datos hidrométricos básicos PHICABHQ. Goupil 3 Flex 9 BASIC 8" ploter. PHICAB: ORSTOM-SENAMHI, 58 p.