

Jaugeage de l'Amazone à Obidos par les méthodes du bateau mobile et des « grands fleuves »

G. JACCON (1)

RÉSUMÉ

La station hydrométrique de l'Amazone, à Obidos, est la plus grande du monde (bassin versant de 4 620 000 km²). Des jaugeages de 100 000 à 250 000 m³/s y sont réalisés chaque trimestre par une équipe de la CPRM (2), dans le cadre de la gestion du réseau de base du DNAEE (3). Invité à participer à la mesure du mois de juillet 1987, par la méthode du bateau mobile, nous avons demandé à disposer de deux journées supplémentaires pour pouvoir faire, en plus, un jaugeage par la méthode des « grands fleuves ».

Cet article décrit les deux jaugeages et compare les résultats obtenus par chaque méthode. Le débit jaugé, compris entre 220 000 et 230 000 m³/s, est l'un des plus élevés jamais mesurés par exploration totale du champ des vitesses.

MOTS-CLÉS : Amazone/Obidos – Méthodes de jaugeages – Bateau mobile – Grands fleuves.

ABSTRACT

GAUGING OF THE AMAZON AT OBIDOS USING THE MOVING BOAT AND « LARGE RIVER » TECHNIQUES

The hydrometric station for the Amazon at Obidos is the largest in the world, with a catchment of 4 620 000 km². Gaugings from 100 000 to 250 000 m³/s are made every quarter by a team from CPRM (2) under the measurement programme of DNAEE (3). After an invitation to participate in the measurement of July 1987, using the moving boat method, we used two extra days to carry out a gauging by the « large river » technique.

The two gaugings are described and the results compared. The measured flow of between 220 000 and 230 000 m³/s is one of the largest measured through the velocity field.

KEY WORDS : Amazon/Obidos – Gauging methods – Moving boat – Large rivers.

RESUMO

MEDIÇÃO DE DESCARGA LÍQUIDA DO RIO AMAZONAS EM ÓBIDOS PELOS MÉTODOS DO BARCO MOVEL E DOS GRANDES RIOS

A estação hidrométrica do rio Amazonas em Óbidos é a maior do mundo (área de drenagem de 4 620 000 km²). Medições de 100 000 a 250 000 m³/s são realizadas a cada trimestre por uma equipe da CPRM (2), dentro da operação da rede básica do DNAEE (3). Convidado para acompanhar a medição pelo método do « barco em movimento » nos meses de julho de 1987, solicitamos um prazo suplementar de dois dias para realizar, também, uma medição completa pelo método dos « grandes rios ».

Este artigo descreve as duas medições e compara os resultados obtidos por cada método. A descarga medida, cujo valor está na faixa de 220 000 a 230 000 m³/s, é uma das maiores jamais realizadas pelo método detalhado.

PALAVRAS CHAVE : Amazonas/Óbidos – Descarga Líquida – Barco movel – Métodos de medição.

(1) Directeur de Recherche ORSTOM – Département Eaux Continentales – CP 02-0287 Brasília Brésil.

(2) CPRM : Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

(3) DNAEE : Departamento Nacional de Aguas e Energia Eletrica.

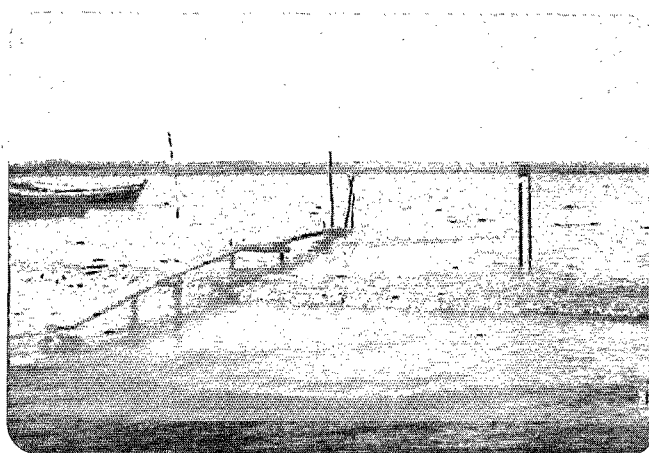


PHOTO 1. – La section de jaugeage de l'Amazone à Obidos, avec l'échelle de rive droite

Avec la valeur 0,994 du coefficient de correction de vitesse K_v , rapport entre les vitesses moyenne totale et moyenne à 1 m de profondeur entre les bouées, obtenues par le jaugeage détaillé, les résultats du jaugeage sont les suivants :

Cote à l'échelle du port	: 624 cm
Débit	: 229 000 m ³ /s
Aire de la section mouillée	: 124 000 m ²
Vitesse moyenne	: 1,847 m/s
Moyenne arithmétique des vitesses mesurées à 1 m	: 1,747 m/s

Le jaugeage s'est déroulé sans aucun incident technique et dans des circonstances favorables (absence de vent, peu d'îles ou troncs d'arbre flottants, aucun passage de navire), ce qui nous permet d'affirmer que ce mesurage est d'excellente qualité.

2.2. MÉTHODE DES GRANDS FLEUVES

Un total de 11 heures de travail effectif, réparti entre les 14 (5 verticales) et 15 juillet (11 verticales), a été nécessaire pour effectuer ce jaugeage.

Étant donné la grande régularité du profil transversal (voir fig. 4), nous avons décidé de limiter à 16 le nombre de verticales, à 6 le nombre de points par verticale et d'augmenter de 40 à 60 secondes la durée des mesures ponctuelles (40 s étant la durée « normalisée » dans l'ensemble du Brésil mais, à notre avis, très insuffisante dans des fleuves de cette envergure). La première verticale a été placée à 100 m de la rive droite et les autres sont distantes entre elles de 150 m.

2.2.1. Principe de la méthode

Les mesures sont faites *sans ancrer* le bateau, qui est maintenu, autant que possible, à la fois dans la section de jaugeage et à la distance choisie pour la verticale.

La position du bateau est déterminée depuis la rive avec deux théodolites, l'un exactement dans l'alignement et l'autre installé à 476 m à l'aval. Les deux observateurs sont en liaison radio permanente avec le bateau et l'observateur du théodolite « aval » reçoit, avant le début des mesures, la valeur des angles correspondant aux 16 verticales. La tâche des deux observateurs est de donner au pilote toutes les indications nécessaires pour placer le bateau sur la verticale de mesure, puis, aux signaux de début et fin de mesure (radio), d'effectuer une visée précise.

La bonne entente entre observateurs, pilote et chef d'équipe est fondamentale.

La vitesse VM, mesurée pendant le temps t, doit être corrigée, en fonction de la dérive du bateau. Désignant par (XI, YI) et (XF, YF) les coordonnées initiales et finales du bateau (fig. 2), la vitesse de l'eau Va recherchée est égale à :

$$V_a = \sqrt{[VM^2 - (\delta X/t)^2] + \delta Y/t}$$

avec $\delta X = XF - XI$
 $\delta Y = YF - YI$

Cette formule admet comme hypothèse que la vitesse mesurée VM est effectivement la résultante des vitesses Va et $(\delta X/t)$. Comme cette hypothèse est assez théorique (comment vérifier que l'ensemble saumon-moulinet s'oriente effectivement ainsi ?), il est essentiel que les deux termes correctifs soient faibles, en regard de la vitesse mesurée par le moulinet. En pratique, nous avons fixé des valeurs limites de 15 m pour δX et δY , ce qui veut dire que toute dérive supérieure à cette valeur implique que la prise de vitesse soit refaite. Ceci suppose évidemment que les calculs de δX et δY soient faits sur le bateau, durant le jaugeage.

La profondeur totale est relevée avec un écho-sondeur au début et après chaque mesure de la vitesse. Outre la profondeur de 1 m, essentielle pour le calcul du coefficient de correction Kv, les autres profondeurs sont prises à 20 %, 40 %, 60 %, 80 % et 95 % de la profondeur totale. Après la mise en place du moulinet à la profondeur calculée, l'angle de dérive du saumon est mesuré et la correction est immédiatement appliquée.

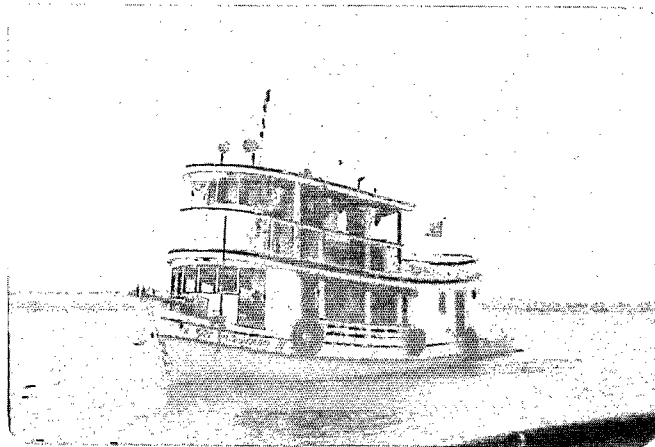


PHOTO 2. - Le bateau Gamboinha III, utilisé pour le jaugeage complet

2.2.2. Matériel utilisé

Le bateau utilisé pour ce jaugeage, le Gamboinha III (photo 2), est une embarcation de 14 m de longueur, tout à fait caractéristique du bassin amazonien, où elle est, tout à la fois, « autobus, camionnette, voire bétailière... ».

Les seuls équipements spéciaux sont un groupe électrogène de 2KVA et un treuil électrique installé sur la proue. Ce treuil contient environ 120 m de câble électro-porteur de 6 mm de diamètre, valeur beaucoup trop élevée qui explique les angles de 40 à 45° de dérive du saumon. Ce bateau, lourd et encombrant, très bruyant, ne comporte même pas de manettes de commande du moteur dans le poste de pilotage. Le pilote « communique » avec le mécanicien par un long fil relié à une sonnette : un appel = « au ralenti », deux appels = « plus vite » trois appels = « changement de marche », etc. Il est incroyable que, dans ces conditions, le pilote arrive à placer le bateau correctement sur une verticale et à limiter la dérive à quelques mètres, pendant les mesures de vitesse.

Les équipements hydrométriques n'ont aucune originalité :

- moulinet à axe horizontal de fabrication brésilienne (marque IH), muni d'un engrenage donnant un contact pour 10 rotations de l'hélice, dont le pas est de 25 cm ;
- le moulinet, fixé sur un support muni d'un gouvernail, est suspendu à 35 cm au-dessus d'un saumon de 120 kg, en fonte ;
- le compteur d'impulsions, de type mécanique, présentant des défaillances, a été remplacé par un simple « couineur ».

2.2.3. Résultats du jaugeage

Au total, 95 mesures ponctuelles de la vitesse ont été faites : elles sont réparties en 16 verticales. Les figures 3 et 3 bis montrent la forme des paraboles de vitesses et la figure 4 donne la répartition des points dans la section transversale et les courbes des débits unitaires et de la vitesse moyenne superficielle.

Tous les résultats (partiels dans les paraboles et totaux en haut de la figure 4) ont été obtenus par calcul (méthode des trapèzes pour les débits unitaires, méthode de la section moyenne pour le débit et la superficie mouillée). Les courbes isotaches, représentées sur la figure 4, ont été tracées « à la main ».

Un dépouillement graphique manuel par la méthode des paraboles a donné les résultats définitifs suivants :

Cote à l'échelle du port	: 620 cm
Débit	: 223 000 m ³ /s
Aire de la section mouillée	: 126 500 m ²
Vitesse moyenne U	: 1,763 m/s
Vitesse moyenne à 1 m entre rives	: 1,672 m/s
Rapport U/V1m	: 1,054

La vitesse moyenne à 1 m de profondeur entre les deux bouées utilisées dans le jaugeage par la méthode du bateau mobile est nettement supérieure à la vitesse V1m donnée ci-dessus car il existe une zone de contre-courant, sur une centaine de mètres près de la rive gauche (d'où la valeur 0,994 du coefficient Kv, utilisée pour la correction du jaugeage « bateau mobile »).

AMAZONAS A OBIDOS

JAUGEAGE COMPLET du 15/07/1987

AMAZONAS A OBIDOS

JAUGEAGE COMPLET du 15/07/1987

PARABOLES DE VITESSES

PARABOLES DE VITESSES

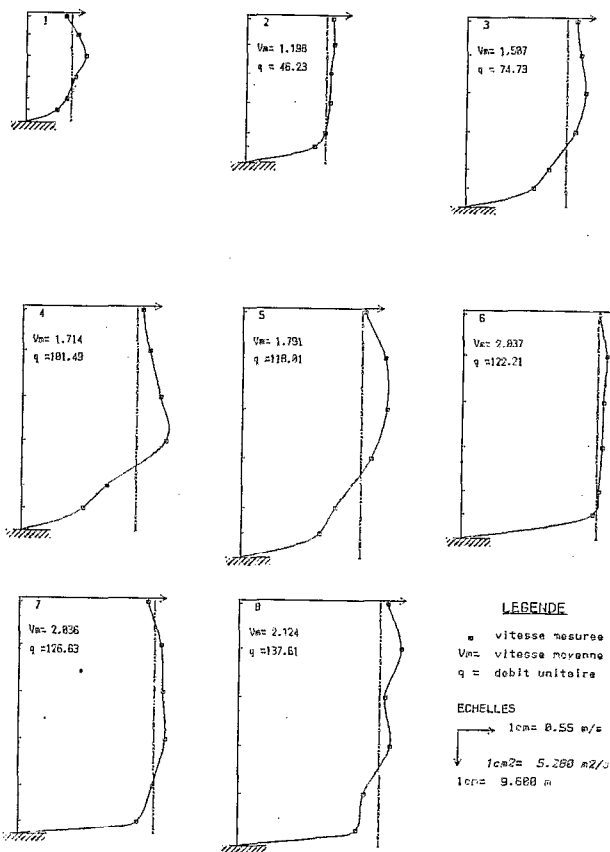


FIG. 3

Plotter EPSON HI-80 - programme G. JACCON

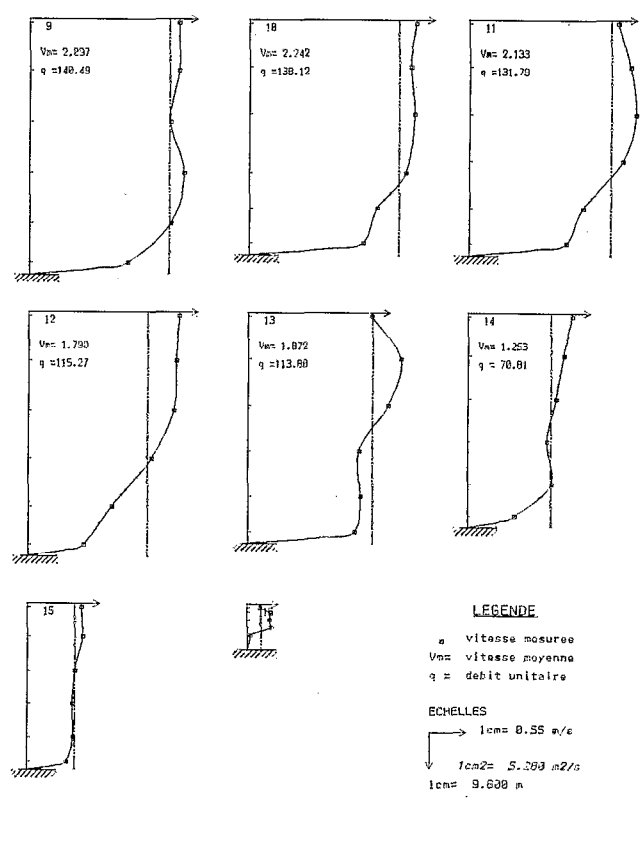


FIG. 3 bis

Plotter EPSON HI-80 - programme G. JACCON

AMAZONAS A DBIDOS

JAUGEAGE COMPLET du 15/07/1987

CALCUL DU DEBIT

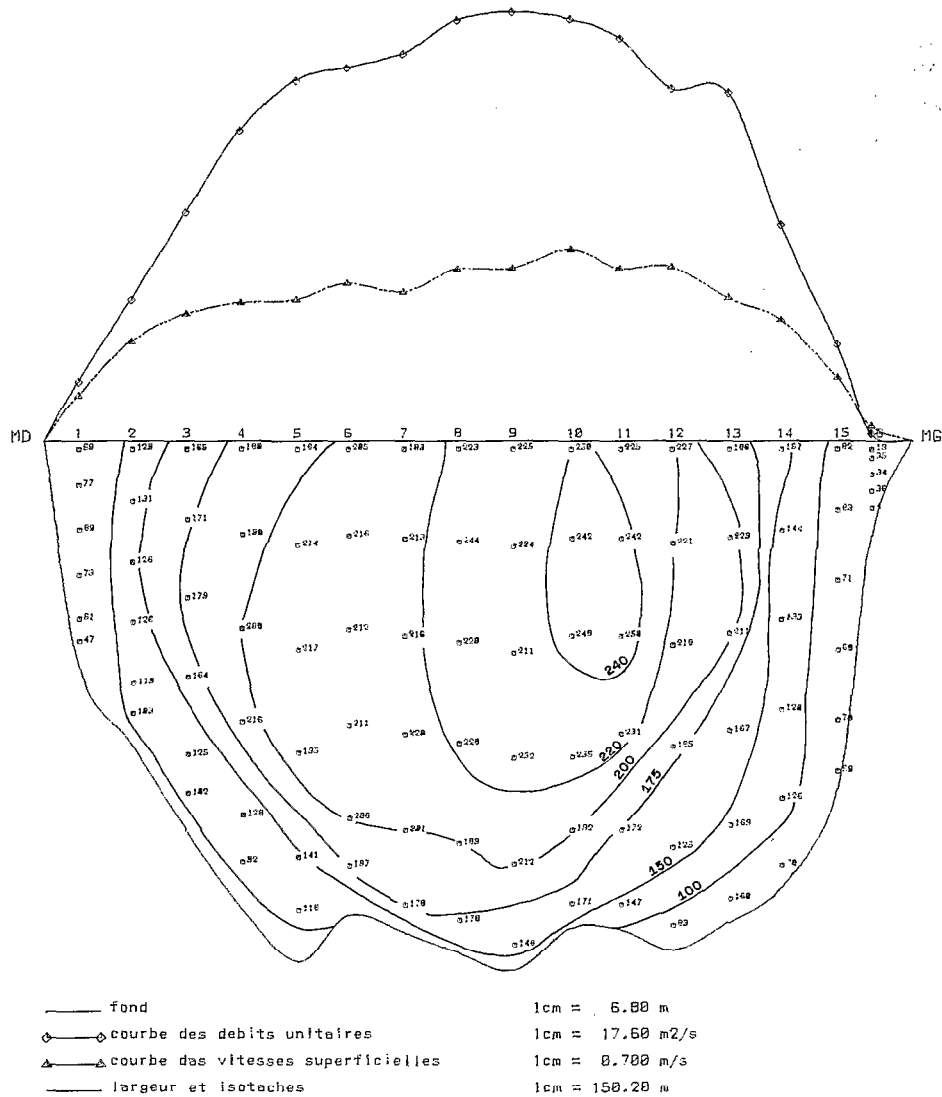
$Q = 221900 \text{ m}^3/\text{s}$

$A = 125900 \text{ m}^2$

$V_m = 1.761 \text{ m/s}$

$V_{ms} = 1.669 \text{ m/s}$

$V_m/V_{ms} = 1.055$



Plotter EPSON HI-80 - programme G. JACCON

FIG. 4

2.2.4. Commentaires

A – Malgré l'absence d'ancrage, le positionnement du bateau, et son maintien sur une « verticale », ont été tout à fait corrects, comme le montrent les valeurs suivantes, calculées à partir des coordonnées du bateau au début de chaque prise de vitesse.

N° vert.	Abcisse théorique	Abcisse réelle				Ordonnée réelle		
		moy.	mini	maxi	écart	amont	aval	écart
1	100	102	100	104	4	-0.5	+0.3	0.8
2	250	250	248	252	4	-0.5	+1.0	1.5
3	400	400	396	404	8	-1.5	+2.6	4.1
4	550	552	548	557	9	-2.1	+7.6	9.7
5	700	707	701	713	12	-2.6	+1.8	4.4
6	850	848	843	856	13	-1.6	+1.2	2.8
7	1000	1003	998	1009	11	-2.7	+1.4	4.1
8	1150	1152	1142	1160	18	-4.7	+0.1	4.7
9	1300	1304	1289	1325	36	-3.7	+2.7	6.4
10	1450	1466	1457	1471	14	-4.4	+1.3	6.7
11	1600	1603	1596	1615	19	-2.5	+0.7	3.2
12	1750	1744	1740	1750	10	-4.1	+0.8	4.9
13	1900	1903	1909	1897	12	-1.3	+0.9	2.2
14	2050	2047	2043	2059	16	-1.7	+1.0	2.7
15	2200	2201	2188	2209	19	-2.1	+1.4	3.5
16	2300	2296	2294	2298	4	0	+3.2	3.2

moy. = moyenne des 6 points d'une même verticale
 écart = différence entre les valeurs minimale et maximale
 Toutes les valeurs ci-dessus sont exprimées en mètres.

Les chiffres des 6^e et 9^e colonnes du tableau donnent les dimensions du rectangle de base de la pyramide verticale dans laquelle ont été faites les mesures. Si l'on excepte la verticale 9, dont la « largeur » de 36 m est excessive, les autres données sont très correctes. Il ne faut pas en effet, se leurrer sur la stabilisation totale d'un bateau par un ancrage en un seul point. Des tests de contrôle faits, durant des jaugeages à Manacapuru, ont permis de vérifier que le déplacement latéral d'un bateau ancré par 40 m de fond et avec 200 m de câble (nécessaire pour l'alignement) pouvait atteindre 15 à 20 m sous l'effet conjugué du vent et du courant.

On pourra observer aussi l'excellent alignement du bateau.

B – Une statistique rapide de la dérive du bateau, pendant les 60 secondes de la mesure de la vitesse, a donné les résultats suivants :

Dérive latérale δX – moyenne des 95 mesures : 3,8 m
 minimum : 0,1 m
 maximum : 14,5 m
 4 valeurs supérieures à 10 m (5 %)
 36 valeurs supérieures à 5 m (38 %)

Dérive longitudinale δY – moyenne des 95 mesures : 3,6 m
 minimum : 0,0 m
 maximum : 22,5 m
 4 valeurs supérieures à 10 m (5 %)
 22 valeurs supérieures à 5 m (23 %)

Nous jugeons ces résultats tout à fait excellents, surtout si l'on considère qu'aucune mesure n'a été refaite (ce jaugeage étant inclus en supplément dans une tournée normale, le temps nous était compté) et que le pilote ne disposait pas d'une commande directe du moteur (nous l'avons vu à plusieurs reprises se précipiter dans la soute pour réveiller le mécanicien à coups de poing...).

C – La forme de certaines paraboles de vitesses (fig. 3 et 3 bis) peut paraître un peu curieuse (n° 4, 13...). Nous ne pensons pas que la méthode en soit la cause. Il est plus probable que ce soit la durée de la mesure : 60 secondes est encore un temps beaucoup trop court, étant donné l'irrégularité de l'écoulement. Il est possible, aussi, que certains décomptes des impulsions (avec le compteur sonore) soient erronés...

3. COMPARAISON DES DEUX RÉSULTATS

Les résultats obtenus sont dans le tableau ci-dessous.

Méthode	Cote cm	Débit m ³ /s	S. mouillée m ²	V. moy. m/s	V moy. 1m m/s
Bateau mobile	624	229000	124000	1,847	*
Grands fleuves	620	223000	126500	1,763	**

* moyenne arithmétique des 570 vitesses ponctuelles mesurées.
 ** vitesse moyenne calculée dans l'intervalle séparant les deux bouées (2250m).

Si l'on considère tout ce qui différencie les deux techniques utilisées, la convergence des résultats est remarquable. Il faut, en effet, se souvenir que la méthode du bateau mobile ne prend en considération que les vitesses superficielles, comme un « quelconque » jaugeage aux flotteurs, dans une section dont la profondeur moyenne est de l'ordre de 50 mètres ! Résultat encore plus remarquable quand on sait que le moulinet utilisé pour ce jaugeage a été laissé en 1972 par G.F. SMOOT (voir paragr. 4.1) et n'a jamais été réétalonné depuis cette date.

La différence de 2 % (2 500 m²) entre les valeurs de la surface mouillée n'est pas significative : il est probable que la valeur de 124 000 m² est plus précise puisque le nombre de mesures est beaucoup plus grand (570 verticales en 8 traversées contre 16).

Si le résultat du jaugeage par la méthode du bateau mobile est excellent, il ne faut pas oublier qu'il dépend, pour une large part, de la valeur du coefficient de correction de vitesse. K_v ne peut être connu que par l'exécution d'un jaugeage détaillé (et non pas comme le suggère G.F. SMOOT « avec quelques verticales bien choisies » car il varie beaucoup d'une verticale à l'autre).

4. RELATION HAUTEUR-DÉBIT

4.1. JAUGEAGES ANTÉRIEURS

Le jaugeage de juillet 1987 est le 112^e de la liste du DNAEE qui débute au mois de mai 1967 avec un jaugeage détaillé, puisque 442 mesures ponctuelles de vitesse ont été faites en cinq jours par une équipe brésilienne renforcée par deux ingénieurs du US Geological Survey (1968). Le débit jaugé à cette occasion a été de 227 000 m³/s pour une cote moyenne de 698 cm.

Un autre jaugeage, tout aussi important, est le onzième de la liste, exécuté le 5 juin 1972 par la méthode du bateau mobile, sous la direction de G.F. SMOOT, le « père » de cette technique, en personne (1967). A partir de cette mesure de démonstration, et jusqu'à mars 1985, tous les jaugeages à Obidos ont été réalisés par cette méthode, avec les mêmes matériels et en utilisant un coefficient de correction de vitesse de 0,90 – valeur proposée par G.F. SMOOT et jamais vérifiée... Dans cette longue série de jaugeages, on relève le débit maximal jaugé (record mondial) de 273 000 m³/s en mai 1974 (cote 741).

En 1985, à la suite d'une série de campagnes de mesures du rio Solimões à Manacapuru (voir figure 1), le DNAEE, à notre suggestion, s'est préoccupé de vérifier de plus près la confiance que l'on pouvait accorder aux débits jaugés par la méthode du bateau mobile. Des campagnes de jaugeages ont été organisées en mars, mai, septembre et décembre 1985, durant lesquelles trois méthodes de mesure différentes ont été utilisées : bateau ancré avec 5 points par verticales, « grands fleuves » avec mesure de la vitesse à 20 % et 80 % de la profondeur (procédure de routine utilisée à toutes les stations des rios Solimões et Madeira depuis 1973) et enfin bateau mobile. Les débits jaugés par la méthode détaillée ont été de 165 000 m³/s en mars (cote 530), 179 000 m³/s en mai (cote 594), 164 000 m³/s en septembre (cote 422) et 127 000 m³/s en décembre 1985 (cote 251).

Il manque dans la liste du DNAEE :

- trois jaugeages réalisés, en 1963/64, par une mission du USGS, avec un bateau de la Marine Nationale brésilienne et cités par Roy E. OLTMAN (1968) ; la méthode utilisée a été celle des « grands fleuves » avec 2 points par verticale ; le plus fort débit jaugé a été de 216 000 m³/s le 16 juillet 1963 (cote 580) ;

- sept jaugeages faits dans le cadre d'un projet conjoint entre l'Université de Washington (USA), l'Université de São Paulo et l'Institut de Recherches Amazoniennes de Manaus, entre septembre 1982 et juillet 1984 ; la méthode utilisée est assez originale mais, à notre avis, assez imprécise : elle procède par intégration verticale, à la descente puis à la remontée du moulinet (vitesse verticale de 20 à 25 % de la vitesse de l'eau), sans ancrage du bateau ; comme dans la méthode des grands fleuves, la vitesse mesurée doit être corrigée suivant la dérive du bateau (souvent importante car le temps de mesure varie de 200 à 700 s), qui est déterminée par des mesures au sextant sur deux bases de 200 à 300 m, installées sur une rive ! Le plus fort débit jaugé par cette méthode a été de 203 000 m³/s en juin 1984 (cote 690).

En résumé, le nombre des jaugeages complets à Obidos est limité à 4 mesures faites entre 1967 et 1971, aux 4 campagnes du DNAEE de 1985 et à notre mesurage de juillet 1987.

4.2. TARAGE

Le tarage de l'Amazone à Obidos est encore indéfini. La figure 5, extraite d'un rapport d'un bureau d'études argentin (1981), donne une idée de la complexité du problème. Nous avons reporté sur cette figure les 4 jaugeages complets de 1985 et le jaugeage de juillet 1987.

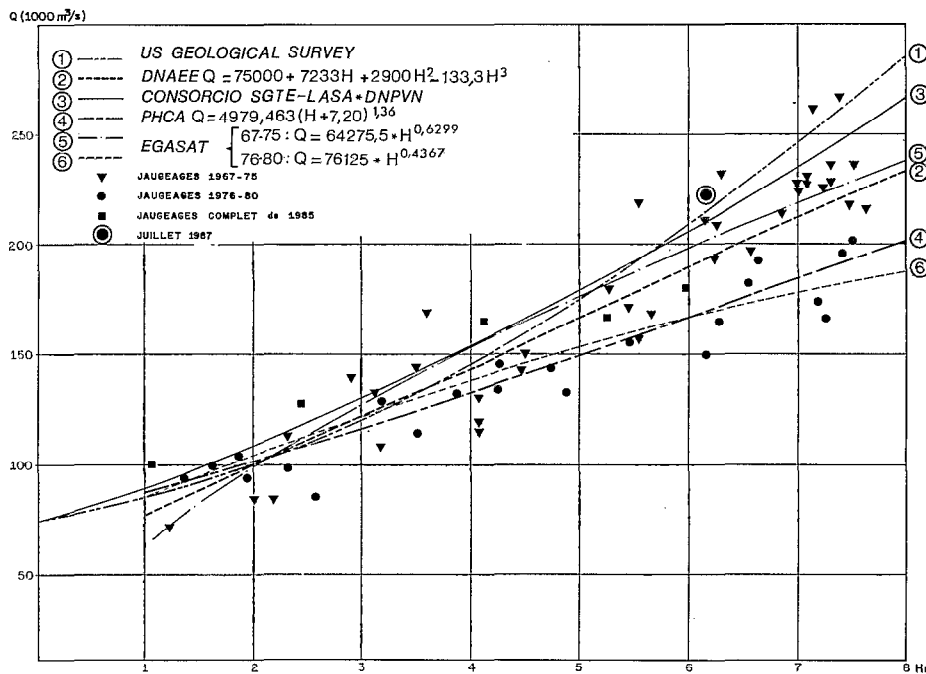


FIG. 5. - Tarage de l'Amazone à Obidos (Dessin : Daniel de SOUZA VABO)

Nous avons repris récemment cette étude. Comme il aurait été absurde de proposer une courbe de plus (surtout que la relation n'est certainement pas univoque !), nous avons décidé d'appliquer la méthode utilisée pour le Solimões à Manacapuru. Elle consiste à ne reporter sur le graphique de tarage que les mesures dignes de confiance, c'est-à-dire celles dont les originaux sont disponibles et peuvent être soumis à un programme de critique sévère sur micro-ordinateur. Il est totalement illusoire de croire que la quantité compense la qualité (du moins, dans ce domaine...).

Au moment de rédiger cet article, nous n'avons pu retrouver que les originaux des jaugeages postérieurs au n° 42, fait au mois de janvier 1976. La saisie des données est actuellement en cours mais elle est très longue car il faut vérifier jusqu'aux diagrammes d'écho-sondeur. Les premiers tests ont montré que certaines mesures, faites par la méthode du bateau mobile sont très douteuses... mais il est encore trop tôt pour dresser un bilan.

5. CONCLUSION

Obidos ! « *o maior posto hidrométrico do mundo...* »

Les Brésiliens sont très fiers de rappeler aux étrangers tous les records mondiaux qui caractérisent leur patrie. Pour tout hydrologue, l'Amazonie c'est comme le Mont Everest pour l'alpiniste : un sommet ! Nous tenons à remercier les ingénieurs et techniciens de la CPRM de Belem, ainsi que les responsables du DNAEE à Brasilia, qui nous ont donné l'occasion d'atteindre ce sommet et d'y exécuter, ensemble, un jaugeage « record ».

Du point de vue technique, l'utilisation de la méthode des « grands fleuves » permet d'opérer en toute sécurité et avec une bonne précision. Pour que cette dernière soit excellente, il suffirait de quelques améliorations : câble électro-porteur de 3 mm de diamètre, compteur d'impulsions électronique et commandes du moteur du bateau dans la cabine de pilotage.

La méthode du bateau mobile a donné un excellent résultat au cours de cette campagne. Il ne semble pas qu'il en soit toujours ainsi et cette technique ne devrait pas être utilisée seule comme cela fut le cas entre 1972 et 1985.

L'inventaire des jaugeages réalisés à Obidos depuis 25 ans ne fait apparaître que 9 mesurages complets par exploration du champ des vitesses : c'est très peu et c'est insuffisant pour une bonne définition de la traduction en débits des 40 années de relevés limnimétriques. Cette station « mondiale » mérite, sans aucun doute plus d'attention de la communauté hydrologique brésilienne et internationale.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 1^{er} octobre 1987

BIBLIOGRAPHIE

- SMOOT (G.F.), CAHAL (D.L.), MEDINA (K.D.), 1967. – A technique for Rapid Measurement of Flows in Large Streams. USGS.
- JACCON (G.), 1984. – Curso sobre Técnicas de Medição de Descarga Líquida em grandes Rios – Fichas Técnicas. MME/DNAEE.
- Anonyme, 1968. – Medição de Descarga e seus Problemas Técnicos no Maior Rio do Mundo. MME/DNAE, Rio de Janeiro.
- OLTMAN (R.E.), 1968. – Reconnaissance Investigations of the Discharge and Water Quality of the Amazon River. USGS, Washington.
- RICHEY (J.E.), *and al.*, 1986. – Water Discharge and Suspended Sediment Concentrations in the Amazon River : 1982-1984. *Water Resources Research*, vol. 22, n° 5 : 756-764, may 86.
- JACCON (G.), CUDO (K.J.), 1987. – Medição de descarga Líquida no Rio Amazonas em Obidos – Relatório Técnico. MME/DNAEE, Juillet 87.
- Anonyme, 1981. – Analisis de la Ley Altura/Caudal del rio Amazonas en Obidos. Estudio Gradowczyk y Asociados S.A.T.