

# **Données hydrologiques pour l'aménagement de MOXOTO sur le rio SAO FRANCISCO**

---

**PREMIÈRES ESTIMATIONS ET PROGRAMME D'ÉTUDES**

D8  
DUB

**DÉCEMBRE 1969**

9789

COMPANHIA HIDRO-ELECTRICA  
do SAO FRANCISCO

C.H.E.S.F.

SOFRELEC

DONNEES HYDROLOGIQUES pour l'AMENAGEMENT de MOXOTO  
sur le RIO SAO FRANCISCO

---

PREMIERES ESTIMATIONS et PROGRAMME d'ETUDES

par

Pierre DUBREUIL

Chef du Département de la Recherche Appliquée  
au Service Hydrologique de l'ORSTOM



DS  
DUB

19 JUIN 1970

Décembre 1969

9789

## S O M M A I R E

	Page
1. <u>PROBLEMES à RESOUDRE et DOCUMENTS DISPONIBLES</u>	1
2. <u>Le MODULE du SAO FRANCISCO</u>	2
2.1. - Qualité des données	3
2.2. - Première estimation	4
2.2.1. - Vue d'ensemble du régime du SAO FRANCISCO	4
2.2.2. - Influence de TRÊS MARIAS	4
2.2.3. - Moyenne interannuelle	5
2.2.4. - Variabilité et précision	6
2.3. - Etudes complémentaires	8
2.4. - Contrôle du débit à PAULO AFONSO	8
3. <u>DEBIT MINIMAL pour MOXOTO</u>	11
3.1. - Ce que l'on sait	11
3.2. - Ce qu'il faudrait savoir	12
4. <u>La CRUE de PROJET</u>	13
4.1. - Examen des observations	14
4.2. - Première estimation	15
4.2.1. - Sur base statistique	15
4.2.2. - Par transposition hydropluviométrique	16
4.2.3. - Passage de la crue de projet sur les ouvrages	17
4.3. - Etudes complémentaires	18

	Page
5. <u>SEDIMENTATION</u>	20
6. <u>POUR une ETUDE GLOBALE des AMENAGEMENTS du SAO FRANCISCO</u>	20
6.1. - Sans régularisation amont	21
6.2. - Avec régularisation amont	21
6.3. - Exploitation	22
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	23

N.B. Cette note constitue l'Annexe II du rapport sur le Dossier C.H.E.S.F. :  
"PROJETO MOXOTO" de SOFRELEC (Janvier 1970).

## 1. PROBLEMES à RESOUDRE et DOCUMENTS DISPONIBLES

Ce rapport doit être considéré comme reprenant et augmentant les notes, rédigées en Septembre 1969, d'"expertise sur documents":

- a) du débit minimal du SAO FRANCISCO pour l'aménagement de MOXOTO ;
- b) du débit régularisable de SOBRADINHO sur le SAO FRANCISCO.

En effet les questions posées, au nombre de quatre, ont pour but de préciser les principales caractéristiques hydrologiques pour le projet de MOXOTO : module interannuel, débit minimal, crue maximale et conditions de sédimentation.

Ces caractéristiques ont déjà fait l'objet de plusieurs études à la demande de la SUVALE ( ex C.V.S.F. ) ou d'ELETROBRAS ; mais les conclusions de celles-ci sont parfois contradictoires, parfois imprécises, car elles ont travaillé sur des données différentes avec des objectifs variés afférant à l'ensemble du fleuve en aval de JUAZEIRO et pas spécialement à MOXOTO.

Il est donc indispensable de reprendre l'étude des caractéristiques hydrologiques de MOXOTO à partir des données d'observations, c'est-à-dire des chroniques de hauteurs ou de débits journaliers.

Ces documents originaux ont été mis à la disposition de la C.H.E.S.F. par la SUVALE, pour les stations de JUAZEIRO et PETROLANDIA, durant notre séjour. Des modifications dans le calcul des débits en ces stations d'une part, et le manque de temps d'autre part ne nous ont pas permis une exploitation complète de ces données.

Le présent rapport fournit simplement des premières estimations rapides des caractéristiques hydrologiques de MOXOTO dues à la consultation des études antérieures précitées et à l'examen sommaire des données d'observations.

Pour améliorer ces estimations, nous donnons quelques indications sur le programme à suivre tout spécialement dans l'exploitation complète des données observées.

Les premières conclusions sont les suivantes :

- module interannuel de 2 870 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO ;
- débit minimal d'étiage de 1 250 m<sup>3</sup>/s, compte tenu de l'action de la retenue de TRÊ, MARIAS ;
- sédimentation mal connue mais vraisemblablement de faible importance ;
- crue maximale de projet de l'ordre de 35 000 m<sup>3</sup>/s.

Sur les trois premiers points, les études complémentaires ne peuvent pas modifier beaucoup les estimations faites ici et elles ne méritent pas d'être faites rapidement, sauf en ce qui concerne le module.

Par contre, l'estimation de la crue est imprécise et son étude complète devrait être refaite le plus rapidement possible. Une telle étude demande une équipe spécialisée en hydrologie et un temps assez long. De son résultat peuvent découler des modifications quant aux décisions à prendre pour l'évacuation des crues à PAULO AFONSO et au niveau aval de la même usine, dans le canyon.

## 2. Le MODULE du SAO FRANCISCO

### Nature des données :

En dehors des stations hydrométriques sur les nombreux affluents du bassin amont du SAO FRANCISCO, on possède une station-clé caractéristique du haut SAO FRANCISCO, celle de TRÊS MARIAS (ou PONTAL BORRACHUDA) où fut construit un barrage vers 1960 à l'issue d'un bassin de 50 000 km<sup>2</sup> environ.

En aval, on possède plusieurs stations le long du fleuve : SAO FRANCISCO, JANUARIA, MORPARA, etc ... et surtout JUAZEIRO et PETROLANDIA.

JUAZEIRO est située à l'issue d'un bassin de 519 580 km<sup>2</sup> et PETROLANDIA plus aval à l'issue de 597 790 km<sup>2</sup>, le site de PAULO AFONSO étant à 12 500 km<sup>2</sup> en aval de PETROLANDIA, et MOXOTO juste amont de PAULO AFONSO. On peut et on doit considérer que le régime du fleuve à MOXOTO et PAULO AFONSO est très bien représenté par la station de PETROLANDIA, l'apport du bassin de quelque 12 000 km<sup>2</sup> sous 600 mm de précipitation annuelle moyenne ne devant pas excéder 20 à 30 m<sup>3</sup>/s a priori (d'après normes JAGUARIBE)

D'autres stations existent en aval : PAO de ACUCAR, TRAIPI.

JUAZEIRO, station la plus ancienne et la mieux connue, sert de contrôle à celle de PETROLANDIA, et à étendre les données de celle-ci ; et cela est d'autant plus facile que le bassin intermédiaire en zone aride apporte très peu d'eau, sauf lors des fortes pluies de Janvier-Avril certaines années.

JUAZEIRO commande en outre le site du projet de barrage de SOBRADINHO.

## 2.1. - Qualité des données

L'analyse critique des données d'observations et le calcul des données de base du débit à JUAZEIRO et PETROLANDIA ont fait l'objet de deux rapports d'Hidrologia Commercial en 1961 (\*). Il apparaît à leur lecture que l'homogénéisation des relevés aux différentes échelles a été bien faite. Quant au tarage, le nombre des jaugeages effectués est élevé (plusieurs centaines réparties dans le temps) et l'on peut admettre que la relation hauteur-débit est connue à environ 5 à 8 % de précision et qu'elle peut être considérée comme stable, depuis 1929 ou 1936, sans altération nette apparente.

Le seul doute que l'on puisse avoir concerne la qualité de l'extrapolation pour le calcul des crues, au-delà de 8 500 m<sup>3</sup>/s, car les deux rapports sont discrets sur ce point. Il faut en effet atteindre environ 14 000 m<sup>3</sup>/s, débit observé en 1960. Or, l'extrapolation du tarage semble avoir uniquement consisté à prolonger l'équation du tronçon supérieur mesuré sans tenir compte de la variation propre de la section mouillée, de la vitesse moyenne, de la pente, de la rugosité, tous éléments essentiels.

Des modifications des équations de tarage ont été apportées par HIDRO-SERVICE en 1969, ce qui oblige à retraduire tous les relevés de JUAZEIRO avant 1960. Mais l'écart est minime, presque négligeable avec les équations antérieures.

Une confrontation de 56 débits moyens mensuels, pris entre 1963 et 1969, montre une excellente homogénéité entre JUAZEIRO et PETROLANDIA. Le débit en cette 2ème station, hors 2 mois erronés, ne s'écarte jamais de plus de 10 % du débit à JUAZEIRO, sauf lorsque des crues se produisent sur le seul bassin intermédiaire.

Par contre, nous n'avons eu aucune information sur la qualité des observations et du tarage de TRÊS MARIAS ( ou PONTAL BORRACHUDA), ni sur la précision des corrélations inter-stations ayant servi à étendre jusqu'à 1929 la série des observations postérieures à 1951 - Cf. rapport U.S.B.R. -.

Les conclusions de notre expertise de Septembre 1969 et de notre visite à l'usine en Décembre 1969 nous incitent à ne pas trop tenir compte dans ce rapport des débits calculés à PAULO AFONSO depuis 1960. Au préalable, il faut que soient effectués de nouveaux étalonnages complets par jaugeages et modèle réduit tenant compte de tous les éléments (déversoir, vannes, turbines) et que soient corrigées les règles de mesure (nombre et place des échelles, heure ...) - Cf. paragraphe 2.4.

---

(\*) Consulter la liste des documents en fin de rapport pour toute citation dans le texte.

Enfin, la construction du barrage de TRÊS MARIAS altère le régime naturel du SAO FRANCISCO, depuis 1962 environ. Les débits moyens mensuels (et journaliers) publiés depuis cette date sont en régime "influencé". Une correction systématique (prise en compte des variations de niveau du réservoir) doit être envisagée afin d'éviter toute équivoque pour les utilisateurs des chroniques de débits ; la mention "débit influencé" ou "débit naturel reconstitué" devrait figurer sur toute publication des données de base relatives à la période postérieure à la mise en service de TRÊS MARIAS.

## 2.2. - Première estimation

### 2.2.1. - Vue d'ensemble du régime du SAO FRANCISCO

Elle mérite de retenir l'attention avant toute analyse ; elle est fournie par la confrontation des modules moyens de la période 1946-60 d'hydraulicité voisine de la période 1929-69 et pour laquelle les données sont assez nombreuses.

On a fait emprunt au rapport U.S.B.R. - Volume I - pour dessiner en coordonnées bi-logarithmiques l'évolution du module et de la lame écoulée avec la surface drainée. On voit que le SAO FRANCISCO a un régime régulier et abondant (supérieur à ses affluents) de l'amont de TRÊS MARIAS jusqu'en aval de JANUARIA (env. 195 000 km<sup>2</sup>). Après la confluence du CORRENTE, l'abondance diminue, le régime s'affaiblit et suit une lente variation, également régulière, jusqu'à PETROLANDIA (597 790 km<sup>2</sup>). Une légère reprise s'effectue alors jusqu'à l'embouchure. A TRAIPI (env. 630 000 km<sup>2</sup>), le module 1946-60 serait de 3 070 m<sup>3</sup>/s contre 2 895 à PETROLANDIA. Le barrage de PAULO AFONSO est à 12 500 km<sup>2</sup> en aval de PETROLANDIA et MOXOTO est entre les deux (environ 12 200 km<sup>2</sup>). On peut donc sans risque, à première vue, considérer que le module à MOXOTO est équivalent à celui qui est mesuré à PETROLANDIA. A titre indicatif, on doit mentionner que le module à JUAZEIRO (519 580 km<sup>2</sup>) est de 2 835 m<sup>3</sup>/s pour cette période de comparaison 1946-60.

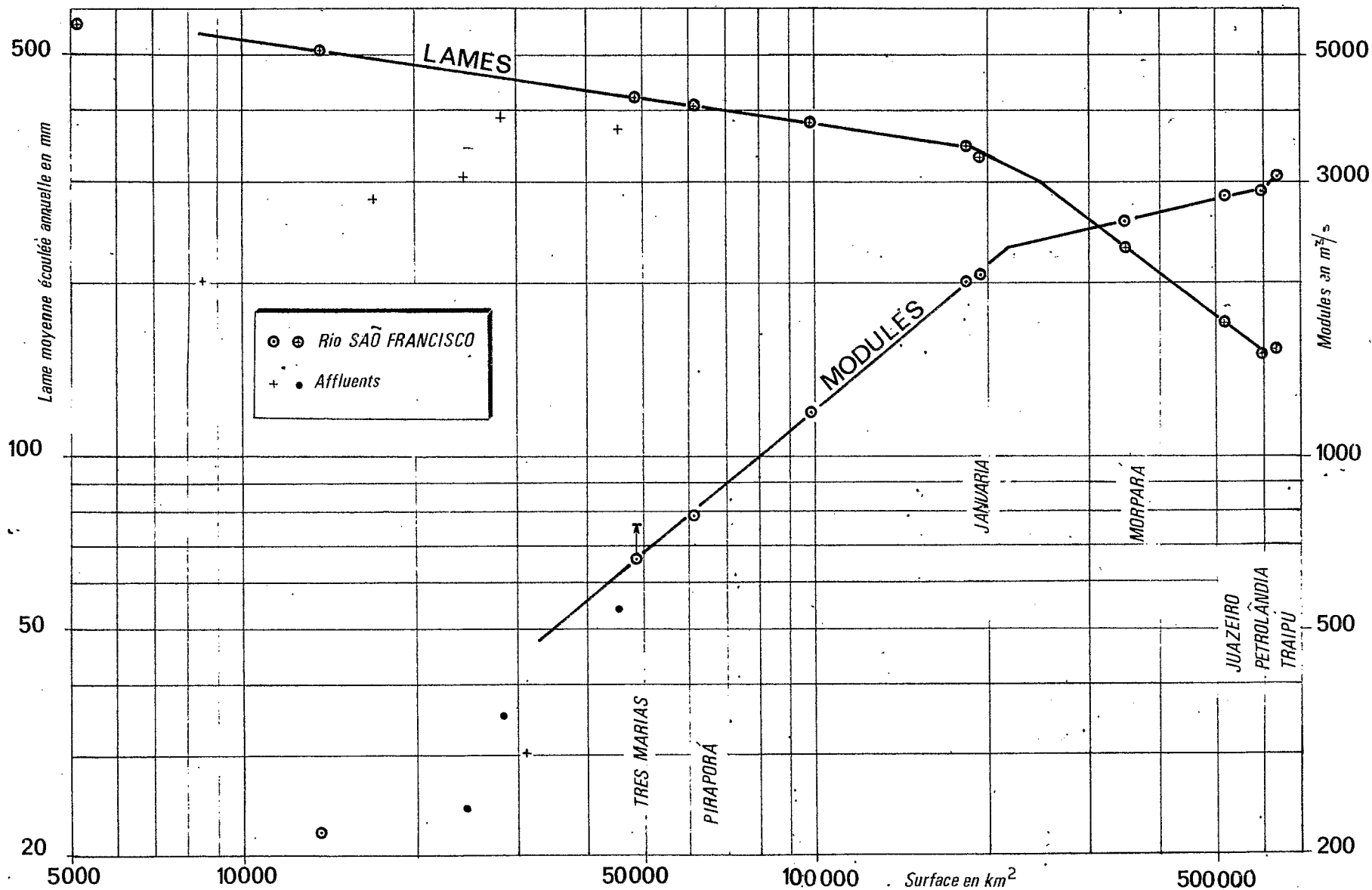
### 2.2.2. - Influence de TRÊS MARIAS

Evidente sur la répartition et la valeur des débits journaliers et mensuels, l'influence de la retenue de TRÊS MARIAS paraît bien moindre sur le module du fleuve en aval. Il y a bien l'évaporation sur cette retenue, évaluée dans un rapport d'ELETROBRAS à 38 m<sup>3</sup>/s. Mais comme il semble que l'on ait omis de considérer l'accroissement des apports directs de la pluie sur la retenue, on peut supposer que l'effet du couple évaporation-pluie est négligeable eu égard à la valeur du module à partir de JUAZEIRO (ordre de 1 %). Ceci bien entendu n'est rigoureusement valable que pour le module interannuel ; pour chaque année on devrait tenir compte des variations



# Modules et lames du SAO FRANCISCO

(Référence 1946-1960 USBR)



du volume emmagasiné. Nous les avons négligées ici, faute d'informations à leur sujet, ce qui ne peut être que de faible importance car la période d'observations d'avant TRÈS MARIAS est encore plus de 2 fois supérieure à la période postérieure.

### 2.2.3. - Moyenne interannuelle

Le module du SAO FRANCISCO doit être analysé sur une année hydrologique, soit Octobre-Septembre, comme le fait U.S.B.R. pour TRÈS MARIAS et JUAZEIRO, soit Novembre-Octobre qui paraîtrait plus judicieux pour PETROLANDIA (Cf. paragraphe 3.1).

Actuellement, nous possédons les données 1929-64 pour l'année hydrologique Octobre-Septembre à TRÈS MARIAS et JUAZEIRO (emprunt à U.S.B.R.).

Nous avons également pu ajouter 1965-67 à JUAZEIRO mais cette période est hétérogène avec la précédente (équations de tarage différentes ; effet négligeable mais à corriger ultérieurement).

Enfin l'on dispose des données récentes (origine SUVALE) pour PETROLANDIA sur la période 1937-67 (année civile).

Le tableau suivant rassemble ces données :

Année	Station	TRÈS MARIAS	JUAZEIRO	PETROLANDIA
	Période	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
Octobre-Septembre	1929-64	752	2 755	
id	1929-67		2 770	(2 840)
Civile	1937-64			2 870
id	1937-67		2 810	2 880

Le module 2 840 m<sup>3</sup>/s à PETROLANDIA pour 1929-67 est obtenu non pas par corrélation mais par une simple correction d'hydraulicité. Ce chiffre peut provisoirement être considéré comme le module à MOXOTO, les améliorations à lui apporter ne devraient pas le modifier de plus de 2 %.

2.2.4. - Variabilité et précision

Ces points ont été examinés sur les seules séries homogènes de 1929-64.

Les distributions des 36 modules admettent des écarts-types de 269,3 et 724,4 m<sup>3</sup>/s respectivement pour TRÈS MARIAS et JUAZEIRO, auxquels correspondent des coefficients de variation (quotient de l'écart-type par la moyenne) de 0,36 et de 0,26.

Le report des 36 valeurs du module sur un graphique en face de leur probabilité d'occurrence (égale à  $\frac{r}{n+1}$  avec  $r$  rang de classement en ordre décroissant et  $n$  nombre total, ici 36) montre que la série des modules à TRÈS MARIAS présente une distribution proche de celle de la loi normale de GAUSS, mais que celle des modules à JUAZEIRO s'en écarte nettement. Pour JUAZEIRO, cela est dû à la faiblesse des apports du bassin en aval de JANUARIA ; les modules y suivent sûrement une loi de type exponentielle (soit PEARSON III, soit logarithmique) pour l'ajustement de laquelle les calculs n'ont pu être faits ici, à temps.

L'examen de la variabilité interannuelle est donc seulement valable pour TRÈS MARIAS et approximatif pour JUAZEIRO ; les modules à PETROLANDIA sont certainement comme ceux de JUAZEIRO.

Le tableau suivant récapitule cet examen (modules en m<sup>3</sup>/s) :

	TRÈS MARIAS	JUAZEIRO	PETROLANDIA (1937-64)
Minimum observé (36 ans)	340	1 750	(1 825)
:1 an sur 10	408	1 970	(2 050)
Moyenne	752	2 755	2 870
:1 an sur 10	1 096	3 900	(4 070)
Maximum observé (36 ans)	1 415	4 540	(4 760)

En première approximation, le module à MOXOTO, dont la moyenne a été estimée à 2 840 m<sup>3</sup>/s, peut prendre, 1 année sur 10 en moyenne, des valeurs proches de 2 000 m<sup>3</sup>/s d'une part et de 4 000 m<sup>3</sup>/s d'autre part.

En supposant que les modules à TRÊS MARIAS suivent bien une loi normale, on peut chercher la signification de la moyenne calculée sur 36 ans d'observations par rapport à la vraie valeur inconnue. Cette moyenne suit elle-même une loi normale d'écart-type égal à  $\frac{269,3}{\sqrt{36}}$  soit 47,5 mm.

En choisissant un intervalle de confiance à 90 %, c'est-à-dire en acceptant le risque de se tromper égal à 10 %, on peut dire que la vraie valeur du module à TRÊS MARIAS se situe dans un intervalle égal à :  $1,64 \times 47,5 = 78$  mm, autour de 752 m<sup>3</sup>/s, intervalle limité par les bornes 674 et 830 :

$$\bar{Q}_{TM} = 752 \pm 78 \quad (\text{IC à } 90 \%)$$

On peut dire encore que le module vrai de TRÊS MARIAS avec 36 ans de relevés est connu à  $\pm 10,4$  % près seulement. Un calcul identique ne peut pas être fait ni pour JUAZEIRO, ni pour PETROLANDIA, dont les modules ne suivent pas une loi normale. Mais on peut ici admettre que la précision doit être du même ordre de grandeur, à savoir que le module à MOXOTO n'est pas connu à mieux de 10 % près et a 90 % de chances d'être situé entre 2 560 et 3 120 m<sup>3</sup>/s.

Etant donné la précision actuelle sur l'estimation du module ( $\pm 280$  m<sup>3</sup>/s), on doit reconnaître que la prise en compte, sur des bases imprécises, de l'apport du bassin entre PETROLANDIA et MOXOTO ne peut guère modifier significativement ladite estimation. Nous avons cependant examiné ce point. Sur le bassin de 12 200 km<sup>2</sup>, le bassin propre au rio MOXOTO constitue la plus grande part. Pour ce bassin ayant une hauteur annuelle de pluies de 600 mm, si l'on applique les normes de calcul du module mises au point pour le bassin du JAGUARIBE, on obtient une valeur de 20 m<sup>3</sup>/s environ.

Par ailleurs, la station aval de TRAIPIU permet d'évaluer l'accroissement du module depuis PETROLANDIA. On trouve environ 170 m<sup>3</sup>/s pour 32 000 km<sup>2</sup> recevant une précipitation annuelle croissante de 500 à 850 mm d'amont vers l'aval avec une moyenne estimable à 750 mm. En proportion du bassin (12 000 sur 32 000 km<sup>2</sup>), cet accroissement serait de 60 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO, chiffre évidemment exagéré puisque le régime des pluies n'est pas le même.

Un chiffre de 20 à 30 m<sup>3</sup>/s peut être raisonnablement retenu (1 % environ de l'apport à PETROLANDIA).

En définitive, on peut dire que le module à MOXOTO est au plus de 2 870 m<sup>3</sup>/s et que ce chiffre est connu à  $\pm 10$  %, estimation ayant 90 % de chances d'être juste.

### 2.3. - Etudes complémentaires

Elles ont pour but d'affiner et d'homogénéiser la première estimation qu'elles ne modifieront sûrement pas beaucoup ; en voici l'énoncé sous forme de programme à exécuter.

2.3.1. - Recalculer tous les débits journaliers, mensuels et annuels (année hydrologique) à JUAZEIRO de 1929 à 1960 à l'aide de la dernière équation de tarage ( $Q = 857 H^{1,227}$  selon HIDROSERVICE et SUVALE, 1969).

2.3.2. - Analyse statistique des modules à JUAZEIRO de 1929 à 1969. Essai d'ajustement d'une loi normale sur  $\sqrt{Q}$  ou  $\log Q$ , sinon d'une loi de PEARSON III (contrôle graphique de validité et test du  $X^2$ ).

En cas de loi normale, la suite du programme est rigoureuse, sinon elle n'est qu'approximative et ses résultats utilisables avec réserve.

2.3.3. - Calcul des modules à PETROLANDIA sur l'année hydrologique de 1937 à 1969. Corrélation des modules (ou des débits mensuels) à PETROLANDIA et JUAZEIRO afin d'estimer les modules depuis 1929 au 1er poste. Corrélation à effectuer soit sur les modules directement, soit sur une transformée ( $\sqrt{Q}$  ou  $\log Q$ ) selon le résultat du paragraphe 2.3.2. Calcul du coefficient et de l'équation de corrélation, de la durée efficace d'observations à PETROLANDIA. Constitution de la série complète étendue des modules à PETROLANDIA.

2.3.4. - Analyse statistique des modules à PETROLANDIA. Même loi que pour JUAZEIRO. En déduire les valeurs de certaines probabilités et l'intervalle de confiance sur la moyenne. Ces résultats seront applicables à MOXOTO, en leur ajoutant 30 m<sup>3</sup>/s.

### 2.4. - Contrôle du débit à PAULO AFONSO

La mesure du débit du SAO FRANCISCO à PAULO AFONSO permet de contrôler les résultats du poste de PETROLANDIA en tenant compte du bassin intermédiaire. Cette mesure est donc intéressante.

Entreprise depuis 1960, cette mesure donne pour 1960-68 un module moyen de 4 020 m<sup>3</sup>/s très supérieur à ce que permettent de supposer les résultats de PETROLANDIA confirmés par ceux de JUAZEIRO. Le module est estimé à 2 870 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO

avec une bande de précision de 10 % équivalente à 2 580 - 3 160 m<sup>3</sup>/s. Avec une même bande de précision choisie a priori le module à PAULO AFONSO pourrait se situer entre 3 600 et 4 400 m<sup>3</sup>/s. Les deux bandes ne se recoupent pas, il y a donc hétérogénéité des données. Les résultats des stations hydrométriques d'amont étant jugés corrects et homogènes entre eux (Cf. paragraphe 2.1.), on doit envisager une surestimation du calcul fait à PAULO AFONSO. Le débit y est calculé en additionnant le débit turbiné, le débit évacué par les vannes et celui qui passe sur le déversoir. Ces divers débits ont été calculés à partir des situations enregistrées vers 18 heures (heure de pointe de la production d'énergie) : cote amont dans la retenue, ouverture des vannes et des turbines.

Des relevés horaires des situations ont été enregistrés au cours de la 2ème quinzaine de Novembre 1969 ; ils montrent que le choix de 18 heures conduit à une surestimation du débit turbiné de l'ordre de 200 à 300 m<sup>3</sup>/s et à une légère surestimation de la cote amont moyenne journalière et des débits passant par les vannes et le déversoir, qui en découlent. La surestimation du débit passant par les vannes doit être faible, de l'ordre de celle due aux turbines.

L'essentiel de l'écart des débits entre PETROLANDIA et PAULO AFONSO est donc imputable au déversoir.

L'étalonnage du déversoir a été fait sur modèle réduit par l'Instituto de Engenharia Militar (échelle du 1/200<sup>e</sup>), vannes et turbines fermées. Le déversoir est long de 2 630 mètres et le lit principal du SAO FRANCISCO passe en rive gauche tandis que l'échelle de lecture de la cote est au droit de la prise d'eau de l'usine I, en rive droite.

On peut faire plusieurs remarques déduites de cette situation du déversoir, de son tarage et des observations faites localement :

- a) la charge sur le déversoir tenant compte de la vitesse d'écoulement, maximale dans l'axe du lit, doit décroître de la rive gauche vers la rive droite, les observations locales font état d'un décalage de 0,20 m avec l'échelle de l'usine I (à 18 heures ?).

Le débit est calculé en ajoutant 0,20 m à la cote lue à 18 h à l'usine I ; or à ce moment la prise d'eau est maximale et la dénivelée aussi, par conséquent sur la moyenne journalière la dénivelée doit être inférieure à 0,20 m, elle est en outre sûrement variable avec le débit.

- b) lorsque les vannes sont ouvertes, l'appel d'eau diminue la charge sur le déversoir, ce qui a été constaté.

L'étalonnage du déversoir sur modèle réduit n'est donc valable que vanes fermées ; lorsque celles-ci sont ouvertes, la charge est inférieure à la cote lue à l'échelle de l'usine I accrue de 0,20 m.

Les calculs du débit sur base horaire en Novembre 1969 ont donné des résultats concordant avec les résultats des stations hydrométriques car le déversoir n'était pas en service.

En conclusion, les débits calculés à PAULO AFONSO sont corrects quand le déversoir ne fonctionne pas ou lorsque les vanes sont fermées.

La connaissance de la charge exacte a été améliorée en Novembre 1969 en remplaçant la cote lue à l'échelle de l'usine I par la moyenne des cotes lues à 2 échelles situées le long du déversoir près des vanes de QUEBRA et de TAQUARI.

On peut améliorer encore le calcul des débits, en adoptant les dispositions suivantes :

- a) installer une 3ème échelle en rive gauche des vanes du bras principal, mettre cette échelle et les deux autres non pas juste sur le déversoir, mais 10 à 20 mètres en amont, utiliser leur cote moyenne ;
- b) lire les cotes aux échelles en dehors de la pointe de 17 h à 20 h, en des heures proches de la demande moyenne journalière ; choisir 2 ou 3 heures caractéristiques entre 8 et 10 h ou entre 14 et 16 heures ;
- c) remplacer les échelles par des limnigraphes permettrait un calcul sûr de la cote ou du débit moyen journalier.

Tout ceci conduira à des résultats satisfaisants quand il y aura soit les vanes seules, soit le déversoir seul en fonctionnement. Mais comme le régime mixte est souvent la règle de gestion utilisée, il faut envisager un nouvel étalonnage du déversoir pour diverses hypothèses d'ouverture des vanes. Ceci pourrait être fait sur le futur modèle réduit au 1/75. En attendant, on peut améliorer l'étalonnage actuel en expérimentant sur le barrage même certains jours où le débit annoncé à JUAZEIRO est assez constant (évacuation soit par vanes, soit par déversoir).

La correction des débits calculés de 1960 à 1968 pourrait être faite :

- a) si l'on peut établir une corrélation pas trop lâche entre la cote lue à l'échelle de la prise d'eau de l'usine I et la cote moyenne des lectures aux échelles QUEBRA et TAQUARI ;

- b) si l'on peut établir une corrélation pas trop lâche entre la cote lue à 18 h et la cote moyenne journalière.

Ces deux corrélations peuvent souffrir des variations avec le débit et l'ouverture des vannes.

### 3. DEBIT MINIMAL pour MOXOTO

#### 3.1. - Ce que l'on sait

L'essentiel a été résumé dans notre note de Septembre 1969 : le débit minimal de 1 250 m<sup>3</sup>/s peut être garanti (avec 2 % de risque d'une occurrence plus sévère) grâce à la régularisation de TRÊS MARIAS (lâchure de 700 m<sup>3</sup>/s environ à prévoir) et au volant de la propre réserve de MOXOTO (433.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> utiles entre 246 et 251 m).

On peut ajouter que l'étiage journalier minimal à PETROLANDIA observé de 1936 à 1968 (données SUVALE 1969) :

- a) se produit entre le 15 Septembre et le 5 Décembre avec 67 % de probabilité en Octobre, 15 % avant, 18 % après, ce qui justifie une année hydrologique débutant le 1er Novembre ;
- b) paraît être resté naturel jusqu'en 1962 puisque cette année-là on a eu 824 m<sup>3</sup>/s, valeur seulement dépassée 4 fois en 27 ans avant, tandis que depuis tous les étiages influencés par TRÊS MARIAS ont été supérieurs à 993 m<sup>3</sup>/s (1964) ;
- c) a atteint des valeurs extrêmes en 1954 : 617 m<sup>3</sup>/s et 1955 : 645 m<sup>3</sup>/s de récurrence d'ordre cinquantennal puisque aucune sévérité plus grande n'a été notée depuis 1929 à JUAZEIRO.

On peut encore dire certaines choses dues à l'action de régularisation de TRÊS MARIAS :

- a) le débit minimal estimé à TRÊS MARIAS en écoulement naturel pour 1954 et 1955 ayant été de 100 m<sup>3</sup>/s, le bassin en aval aurait fourni quelque 520 à 550 m<sup>3</sup>/s. L'élévation jusqu'au débit de 1 250 m<sup>3</sup>/s exige une lâchure de l'ordre de 700 m<sup>3</sup>/s par le barrage de TRÊS MARIAS ;
- b) des simulations sur base mensuelle du fonctionnement de TRÊS MARIAS (HIDROSERVICE Alternative dite III-A, CAEEB-Meco Group) ont montré que l'ouvrage permettait



de franchir la période critique de 1953-56 en garantissant 1 250 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO à l'échelle mensuelle, 1 155 m<sup>3</sup>/s à l'échelle journalière.

L'obtention continue de 1 250 m<sup>3</sup>/s est possible lors de cette phase critique en prélevant 320 millions de m<sup>3</sup> dans la retenue de MOXOTO (descente de 251 m à 247,20 m selon le rapport CAHEB-Ieco Group).

### 3.2. - Ce qu'il faudrait savoir

La retenue de MOXOTO pouvant jouer un rôle régulateur à l'échelle hebdomadaire d'une part, et le débit y entrant étant influencé par le fonctionnement de TRÊS MARIAS, d'autre part, ceci implique de poser certaines questions et de faire certaines études. Mais ces études ne devraient pas modifier le débit minimal garanti; elles pourront confirmer son estimation et apporter dans le futur des bases de discussion plus solides.

3.2.1. - La donnée intéressante est le débit minimal moyen sur 8 jours consécutifs  $Q_8$ ; cette donnée doit être calculée à PETROLANDIA et JUAZEIRO. On pourrait faire de même pour  $Q_{30}$  (minimum moyen sur 30 jours consécutifs).

Une corrélation entre  $Q_8$  et  $Q_{30}$  d'une part,  $Q_8$  et  $Q_1$  ( $Q$  minimal journalier) d'autre part, aux 2 stations montrera l'évolution des apports en étiage.

Une corrélation entre stations permettra d'étendre la série de PETROLANDIA jusqu'en 1929.

On opérera évidemment jusqu'à 1962 inclus, c'est-à-dire sur débits naturels.

Un examen des temps de parcours de l'étiage le long du SAO FRANCISCO en remontant vers TRÊS MARIAS apporterait des éléments pour la future exploitation des ouvrages en cas de sécheresse (annonce à l'avance ou lâchures de protection à TRÊS MARIAS ...).

Une analyse statistique de  $Q_8$  est envisageable.

3.2.2. - La seule étude vraiment exhaustive du débit minimal serait la simulation de gestion de TRÊS MARIAS en tenant compte des règles définies ou à définir (production d'énergie de pointe, de base, lâchure de 500 m<sup>3</sup>/s pour navigation - selon SUVALE - ... etc ... ?).

La série des débits naturels à TRÊS MARIAS (1929-62 ?) ainsi modulée devrait être transférée à PETROLANDIA en considérant une méthode (type MUSKINGUM) de propagation d'onde.

Là, cette série serait sommée avec la série des débits naturels du bassin intermédiaire (PETROLANDIA moins TRÊS MARIAS).

La simulation aura une base journalière ou mensuelle, selon les résultats des études du paragraphe 3.2.1.

Plusieurs hypothèses de règles de gestion peuvent être envisagées. Mais l'optique est ici plus réaliste et différente de celle qui présida aux essais déjà effectués par d'autres (HIDROSERVICE, LASA, CAEEB-Meco Group..). Il ne s'agit plus de gérer fictivement TRÊS MARIAS pour obtenir le débit garanti le plus élevé possible à MOXOTO, mais il s'agit d'appliquer les règles propres de gestion de la CEMIG dans lesquelles la notion de débit à garantir à la C.H.E.S.F. ne paraît pas du tout inscrite (cela serait pourtant souhaitable).

Une étude statistique des débits à MOXOTO (minimum journalier de 8, de 30 jours, ... etc ...) terminerait cette simulation et fournirait tous les éléments de choix et de décision.

#### 4. La CRUE de PROJET

Dans son avant-projet de Mai 1969, SOFRELEC donne comme débit maximal de la crue de projet un chiffre de 28 000 m<sup>3</sup>/s, que lui a fourni la C.F.E.S.F., et prévoit un évacuateur de cette capacité (vannes de fond) avec une sécurité de 7 000 m<sup>3</sup>/s supplémentaires (par déversoir avec surcharge de 2 m).

Ce débit maximal diffère notablement de ceux que l'on trouve dans les diverses études consultées :

- a) 30 000 m<sup>3</sup>/s (selon LASA) et 35 000 m<sup>3</sup>/s (selon HIDROSERVICE) pour JUAZEIRO et SOBRADINHO ;
- b) 35 800 m<sup>3</sup>/s (selon U.S.B.R.) pour ITAPARICA (équivalent à MOXOTO) ;
- c) 39 000 m<sup>3</sup>/s (selon HIDROSERVICE) et 40 000 m<sup>3</sup>/s (selon CAEEB-Meco Group) pour PETROLANDIA et MOXOTO.

Cette dispersion des résultats mérite une analyse.

#### 4.1 - Examen des observations

La comparaison sur 1937-69 des crues à JUAZEIRO et PETROLANDIA montre deux choses intéressantes :

- a) il n'y a coïncidence de crue maximale annuelle que 20 ans sur 29 ans, les 9 autres années la crue à PETROLANDIA est le fait de précipitations sur le bassin intermédiaire ;
- b) lorsqu'il y a coïncidence, le temps de parcours entre pointes varie de 1 à 7 jours avec 75 % de cas égaux à 2 et 3 jours ;
- c) lorsqu'il y a coïncidence, le débit maximal à PETROLANDIA est égal à celui de JUAZEIRO, ou légèrement supérieur d'environ 500 m<sup>3</sup>/s pour les crues moyennes (5 000 à 10 000 m<sup>3</sup>/s) et au plus de 750 m<sup>3</sup>/s pour la crue maximale observée en 1949 (13 265 m<sup>3</sup>/s à JUAZEIRO et 13 985 m<sup>3</sup>/s à PETROLANDIA) ;
- d) les crues en coïncidence proviennent du haut-bassin et présentent des formes arrondies "en cloche" avec une période de 30 à 45 jours de débits supérieurs à 7 500 m<sup>3</sup>/s quand le maximum dépasse 10 000 m<sup>3</sup>/s (1943, 1945, 1946, 1949 par exemple) ;
- e) lorsqu'il n'y a pas coïncidence des maximums annuels, le bassin en aval de PETROLANDIA (78 000 km<sup>2</sup> environ) donne une crue violente et courte qui se superpose à l'onde de crue d'amont. Cette crue représente un débit maximal propre de 3 000 (1947, 1967) à 7 000 m<sup>3</sup>/s (1960) et elle dure au plus 10 jours au-dessus de 7 500 m<sup>3</sup>/s de débit de base amont.

Il est très important de remarquer que la plus forte crue observée à PETROLANDIA est due à des pluies sur le bassin intermédiaire : 14 160 m<sup>3</sup>/s de pointe en Mars 1960. Tandis que la même année la pointe à JUAZEIRO fut seulement de 7 900 m<sup>3</sup>/s environ, le maximum observé à cette station ayant été de 13 200 m<sup>3</sup>/s environ en Mars 1949. Depuis le début du siècle, les souvenirs historiques laissent penser que cette crue de Mars 1949 fut dépassée 2 fois à JUAZEIRO : en 1919 (environ 9,80 m et 14 500 m<sup>3</sup>/s) et en 1926 (environ 9,67 m et 14 000 m<sup>3</sup>/s).

On peut affirmer sans risque d'erreur que la crue maximale à PETROLANDIA sera due à des fortes pluies sur le bassin intermédiaire en aval de JUAZEIRO (de 78 210 km<sup>2</sup>) provoquant une crue brutale locale venant se surimposer à la crue provenant de l'amont de JUAZEIRO.

Ceci est confirmé par l'examen des dates d'occurrence des maximums annuels répartis de Janvier à Mars à JUAZEIRO et concentrés sur Février et surtout Mars (reflet du régime des pluies sur le bassin intermédiaire) à PETROLÂNDIA, comme le montre le tableau suivant :

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
JUAZEIRO	25 %	25 %	25 %	22 %	3 %
PETROLÂNDIA	15 %	30 %	40 %	15 %	

La crue du 31 Mars 1960 a donné 14 160 m<sup>3</sup>/s à PETROLÂNDIA. En supposant une contribution du bassin compris entre PETROLÂNDIA et MOXOTO (12 200 km<sup>2</sup>) identique à celle du bassin situé entre JUAZEIRO et PETROLÂNDIA (78 210 km<sup>2</sup>) qui fut de 14 160 - 7 100 soit 7 000 m<sup>3</sup>/s environ, on obtient 15 200 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO ou PAULO AFONSO. Dans les mêmes conditions, la crue du 12 Mars atteignait presque les mêmes valeurs : 13 200 m<sup>3</sup>/s à PETROLÂNDIA, 7 975 m<sup>3</sup>/s à JUAZEIRO et en conséquence de l'ordre de 14 000 m<sup>3</sup>/s à MOXOTO.

Les niveaux maximums dans le canyon ont été observés le 31 Mars : 161,62 m à 7 h alors que la cote amont était de 229,10 m (charge de 0,60 m sur le déversoir) ; le calcul du débit à PAULO AFONSO à l'aide des équations disponibles donne 18 395 m<sup>3</sup>/s, ce qui est évidemment un peu fort.

#### 4.2. - Première estimation

##### 4.2.1. - Sur base statistique

Ce n'est certainement pas la meilleure façon d'estimer une crue de projet car un ajustement de loi de probabilité à un échantillon restreint (ici 40 ans au plus) ne peut être rigoureusement extrapolé au-delà de 3 fois la grandeur de cet échantillon (ici 120 ans), alors que l'on a continué d'assimiler la crue de projet à la récurrence décennale. Cependant, l'analyse statistique donne un ordre de grandeur et permet d'éviter de grosses erreurs dans l'estimation directe. Une série de débits maximums annuels suit certainement une loi exponentielle, du type de GUMBEL par exemple ; vérification en sera faite quand on aura tous les éléments de calcul.

L'analyse statistique d'HIDROSERVICE semble avoir été faite sur la base d'un ajustement graphique ; ses résultats fournissent une première estimation pas trop imprécise :

Base 1929-60	JUAZEIRO	PETROLANDIA	
Récurrance 10 ans	10 000	11 300	m <sup>3</sup> /s
Récurrance 100 ans	16 000	19 000	m <sup>3</sup> /s
Récurrance 10 000 ans	(35 000)	(39 000)	m <sup>3</sup> /s

#### 4.2.2. - Par transposition hydropluviométrique

Une maximisation de la crue de 1949 a été faite par HIDROSERVICE et LASA pour JUAZEIRO - SOBRADINHO, mais la méthode n'est pas explicitée et il vaut mieux n'en pas tenir compte, car les conditions sont différentes pour MOXOTO (bassin accru de 90 000 km<sup>2</sup> environ). Seul U.S.B.R. a procédé à une maximisation de la crue de 1960 pour le site de ITAPARICA (12 200 km<sup>2</sup> amont de MOXOTO), selon le processus suivant :

- a) reconstitution de la crue de 1960 à partir des pluies du 5 au 10 Mars appliquées à 2 hydrogrammes unitaires, l'un pour la partie amont du bassin intermédiaire (amont de SAO MIGUEL), l'autre pour la partie aval, l'ensemble venant se juxtaposer à l'onde de crue observée à JUAZEIRO ;
- b) "centrage" des pluies de Mars 1960 juste amont d'ITAPARICA et augmentation de 25 % (transposition-maximisation) ;
- c) "arrangement" le plus dangereux des pluies sur les 6 jours étudiés.

La crue de projet résulte de la somme des éléments suivants :

- la crue de 1949 à JUAZEIRO (1er rang en ce lieu),
- les 2 crues maximisées d'après 1960 sur le bassin intermédiaire,
- la pluie directe sur la retenue.

Le résultat est :

35 800 m<sup>3</sup>/s de pointe

31,8 . 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> en 20 jours

Bien que ces deux approches soient un peu criticables et bien que MOXOTO se situe à quelque 12 000 km<sup>2</sup> en aval de PETROLANDIA, on peut admettre en première estimation que le débit maximal de la crue de projet se situe vers 35 000 m<sup>3</sup>/s (avec une imprécision supérieure à 10 %) pour MOXOTO.

#### 4.2.3. - Passage de la crue de projet sur les ouvrages

Aucun problème à MOXOTO où le projet envisage une évacuation mixte de 28 000 m<sup>3</sup>/s par les vannes et de 7 000 m<sup>3</sup>/s par le déversoir.

Compte tenu de la capacité de la retenue de MOXOTO, il n'est pas interdit de penser qu'entre la cote d'exploitation et 253 m (2 m de charge sur déversoir) l'on pourrait emmagasiner plusieurs centaines de millions de m<sup>3</sup> et abaisser la pointe de crue. Sans hydrogramme de crue à faire évacuer, on se contente ici de supposer que la pointe est réduite à 33 000 m<sup>3</sup>/s à l'entrée de PAULO AFONSO.

En cette usine, le point crucial est le niveau aval dans le canyon. Une courbe hauteurs-débits a été établie sur place à l'aide des débits de JUAZEIRO. Une certaine dispersion y apparaît, due à la négligence du temps de parcours et du bassin intermédiaire. On peut cependant utiliser cette courbe valable entre 140 m et 155 m comme base d'extrapolation pour la crue de projet.

L'échelle de référence (aujourd'hui disparue) était située entre les sorties des turbines des usines I et II. On a utilisé deux profils en travers du canyon de part et d'autre de cette échelle, l'un en amont de la sortie des turbines n° 7-8-9, l'autre dans l'axe de l'usine III ; ils donnent des sections mouillées comparables dont on a pris la moyenne.

Les calculs ont été menés à l'aide de l'équation de MANWING-STRICKLER :

$$Q = S \cdot R^{2/3} \cdot K \cdot I^{1/2}$$

Q : débit en m<sup>3</sup>/s

S : section mouillée en m<sup>2</sup>

R : rayon hydraulique (section divisée par périmètre mouillé)

I : pente de la ligne d'eau

K : coefficient de rugosité

On a fait l'hypothèse de départ suivante, le fond du canyon étant inconnu à 140 m, on a 1 900 m<sup>3</sup>/s et une largeur de 50 m ; il a été admis une profondeur de 20 m d'eau courante, donc  $S = 1\ 000\ m^2$  et  $V = 1,9\ m^3/s$ , ce qui est admissible.

On a ensuite calculé  $K I^{1/2}$  pour tous les débits connus

$$K I^{1/2} = \frac{Q}{S \cdot R^{2/3}}$$

pour des cotes choisies égales à 140, 150, 155 et 162,60 mètres.

Le produit  $K I^{1/2}$  croît régulièrement jusqu'à 0,762.

Si l'on adopte le profil en long dressé en 1949 dans le canyon du pied de la grande chute jusqu'à l'arrivée du bras du CAPUXU, partie qui englobe la zone des profils en travers et de l'échelle, on trouve  $I = 3,5\ m/km$  ou 0,0035. Il lui correspond une valeur de  $K = 12,8$  pour la crue de 1960 (162,60 m), ce qui est admissible pour une section aussi tourmentée.

L'extrapolation a été faite en faisant croître K jusqu'à 14,2 et  $K I^{1/2}$  jusqu'à 0,84. Cela donne les résultats suivants :

Cote	Débit
168 m	24 000 m <sup>3</sup> /s
170 m	29 000 m <sup>3</sup> /s
171,50 m	33 000 m <sup>3</sup> /s

La vitesse moyenne est alors comprise entre 5 et 6 m/s.

Toute autre hypothèse sur la profondeur de l'eau courante dans le canyon ou sur la variation de la pente avec le débit modifierait peu ce résultat, auquel on ne peut pas demander une précision supérieure à  $\pm 1,50\ m$  environ.

#### 4.3. - Etudes complémentaires

Il s'agit de reprendre les estimations sur base statistique et par transposition hydropluviométrique :

- a) en utilisant toutes les données disponibles les plus récentes (jusqu'à 1969 et avec les derniers tarages) à JUAZEIRO et PETROLANDIA ;
- b) en améliorant les processus.

Le programme suivant peut être proposé.

- 4.3.1. - Analyse statistique des séries de débits maximaux journaliers annuels à JUAZEIRO et PETROLANDIA sur la base d'une loi de GUMBEL (ou apparentée), détermination des crues de récurrence 100 ans (valable) et 10 000 ans (simple approximation).
- 4.3.2. - Analyse des plus forts épisodes pluvieux connus dans le Nord-Est pour des zones de hauteurs annuelles de 500 à 1 000 mm. Une telle collection de données observées a été faite de manière plus ou moins exhaustive par nous lors de nos études du bassin du JAGUARIBE. Il faut étudier en détail, jour par jour, les épisodes pluvieux des 5-10 Mars et 20-30 Mars 1960, causes de deux très fortes crues à PETROLANDIA (U.S.B.R. n'a d'ailleurs étudié que le 1er épisode alors que c'est le second qui donne la plus forte crue à PAULO AFONSO). Après ces analyses, on édifiera le hyétogramme enveloppe maximal régional de la pluie de projet sur base journalière (durée de 6 à 10 jours environ ...).
- 4.3.3. - Reconstitution des crues de 1960 sur le bassin intermédiaire (PETROLANDIA moins JUAZEIRO) à partir des pluies non pas par simple hydrogramme unitaire (solution globale un peu grossière), mais par modèle matriciel (zones iso-chrones de parcours des crues, fonction de ruissellement, fonction d'étalement de l'onde de crue ...).
- 4.3.4. - Calcul de la crue de projet en appliquant le modèle matriciel de 1960 au hyétogramme enveloppe régional et en juxtaposant le phénomène à la crue maximale observée de JUAZEIRO, tenant compte du temps de parcours.
- 4.3.5. - Examen des conditions d'évacuation de la crue de projet à MOXOTO puis à PAULO AFONSO (atténuation de la pointe possible dans la retenue de MOXOTO), où il faudra également estimer le niveau aval pour cette crue par extrapolation de la courbe hauteur-débit du canyon (tracé à améliorer par nouvelles mesures de pente de la ligne d'eau en crue, et de la vitesse superficielle).



## 5. SEDIMENTATION

Le transport de sédiments par le SAO FRANCISCO est très mal connu. On a seulement effectué 11 mesures de débit en suspension à JUAZEIRO d'Août 1960 à Mars 1961 : pour des débits variant de 830 à 6 400 m<sup>3</sup>/s, le débit en suspension passe de 1 000 à 123 000 t/j. La corrélation est très lâche ; son application à la courbe des débits classés fournit un résultat moyen très approximatif.

A partir de 21 prélèvements de fond, le débit de charriage a été calculé théoriquement égal à 90 % de celui en suspension (ceci paraît élevé).

Le total moyen annuel serait de 17.10<sup>6</sup> tonnes, chiffre qui ne peut être qu'un ordre de grandeur.

Il serait utile de refaire au moins une campagne de mesures des débits en suspension tout au long d'un cycle hydrologique, tant à JUAZEIRO qu'à PETROLANDIA, et en effectuant 2 sinon 3 et 4 mesures complètes par mois.

On pourra ainsi vérifier et améliorer les résultats de 1960-61 et obtenir une liaison plus précise entre débit liquide et sédiments transportés, en tenant éventuellement compte de la position du débit dans le cycle hydrologique (crue, décrue ...).

Quant au risque de dépôt dans la retenue de MOXOTO, il est actuellement peu prévisible. Les relevés réalisés dans la retenue de PAULO AFONSO en 1961 ont montré que depuis 1955 le dépôt avait été de l'ordre de 430 000 m<sup>3</sup>, soit environ 68 000 m<sup>3</sup>/an. Evidemment, cela ne fait guère plus de 4 % du transit estimé à JUAZEIRO. Mais la retenue de PAULO AFONSO est très petite (15.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> de réserve utile - ou totale ? - détail qui n'a pu être précisé) donc les vitesses y restent conséquentes et le dépôt peu facile.

Il n'est pas certain qu'il en soit de même pour la retenue de MOXOTO nettement plus volumineuse (environ 1 milliard de m<sup>3</sup> à 251 m). Il suffirait que le dépôt y soit quinze fois supérieur à celui de PAULO AFONSO pour représenter plus de 5 % du transit. Ceci mériterait d'être vérifié sur modèle réduit comme l'on pourrait refaire un relevé des fonds de PAULO AFONSO pour confirmer le relevé de 1961, bien qu'il n'y ait pas a priori beaucoup d'inquiétude à avoir.

## 6. POUR une ETUDE GLOBALE des AMENAGEMENTS du SAO FRANCISCO

On a fait ressortir dans le chapitre 3 consacré à l'étiage l'intérêt de

l'étude du régime influencé par la gestion simulée de TRÊS MARIAS. Il en est de même pour le module dont l'intérêt est limité. En effet, dans un avenir proche, on envisage de construire un réservoir de régularisation interannuelle en amont de MOXOTO, SOBRADINHO par exemple. Comme on l'a vu dans notre note de Septembre 1969 sur ce sujet, la notion intéressante devient le débit régularisable plutôt que l'ensemble "module-étiage" et conduit si l'on analyse les variations de chute à la notion de puissance disponible.

L'accès à ces notions est possible à travers un ensemble de simulation des écoulements dans les retenues de TRÊS MARIAS et SOBRADINHO. Ceci pourrait s'exécuter selon le processus décrit schématiquement ci-dessous.

#### 6.1. - Sans régularisation amont

6.1.1. - Analyse de la propagation de l'onde de crue de TRÊS MARIAS à JUAZEIRO, puis à PETROLANDIA, en temps et en débit (méthode MUSKINGUM par exemple). Le débit sortant de TRÊS MARIAS  $Q_{TMS}$  devient ainsi à JUAZEIRO  $Q'_{TMS}$  et à PETROLANDIA  $Q''_{TMS}$  à  $J^1$  et  $J''$  jours plus tard.

6.1.2. - Le débit à MOXOTO est la composition du débit naturel en aval de TRÊS MARIAS et du débit issu de TRÊS MARIAS par application des règles de gestion de l'usine au débit entrant :

$$Q_{TME} \longrightarrow Q_{TMS}$$

On a donc à l'entrée de MOXOTO (assimilé à PETROLANDIA) :

$$Q_{MXE} = Q_{PLT} - Q''_{TME} + Q''_{TMS}$$

#### 6.2. - Avec régularisation amont

En assimilant SOBRADINHO à JUAZEIRO, on aura donc deux systèmes, l'un pour SOBRADINHO :

$$Q_{SE} = Q_{JZ} - Q'_{TME} + Q'_{TMS}$$

l'autre pour MOXOTO :

$$Q_{ME} = Q'_{SS} + Q_{PLT} - Q'_{JZ}$$

sachant que l'on appelle :

- $Q_{SE}$  débit entrant à SOBRADINHO
- $Q_{SS}$  débit sortant de SOBRADINHO
- $Q'_{SS}$  débit sortant de SOBRADINHO transporté à MOXOTO
- $Q'_{JZ}$  débit à JUAZEIRO transporté à MOXOTO

### 6.3. - Exploitation

Ces divers systèmes d'écoulement doivent être bâtis à partir des données de la période d'écoulement naturel, avant TRÊS MARIAS, c'est-à-dire 1929-61.

Le pas de temps d'exploitation pourrait être soit la journée (avant régularisation), soit plutôt le mois. Dans ce cas, la série observée devrait être étendue à quelque 200 ans par tirage au hasard.

De ces exploitations, on tirerait des ensembles de débits minimaux, de débits régularisés ou de puissances disponibles qui pourraient être examinés d'un point de vue statistique.

Il est bien certain que ces diverses études ne présentent pas actuellement d'intérêt immédiat et qu'elles n'ont été évoquées ici que pour une recherche future optimisant l'exploitation des ouvrages de production d'énergie contruits ou à construire en aval de JUAZEIRO.

LISTE des DOCUMENTS CONSULTÉS (par ordre chronologique)

- CHESF - 1949 - "Projeto da Usina Hidro-Eletrica de PAULO AFONSO".
- HIDROLOGIA Commercial - 1961 - "Estudo do regime fluvial da rio SAO FRANCISCO em JUAZEIRO".
- HIDROLOGIA Commercial - 1961 - "Estudo do regime das descargas no curso submedio do rio SAO FRANCISCO" - pour CVSF.
- LASA, TECNOSOLO - 1962 - "Barragem de SOBRADINHO - Aproveitamento multiplo - Rio SAO FRANCISCO" - pour CVSF.
- HIDROSERVICE (HS 17 - R6 - 63) - 1963 - "Estudios hidrológicos das influencias da barragem de SOBRADINHO - Plano de Aproveitamento para fins multiplos do Submedio SAO FRANCISCO" - pour CVSF.
- U.S. Bureau of Reclamation - 1967 - "Reconnaissance Appraisal - Land and Water resources - Rio SAO FRANCISCO basin" - pour AID (USA).
- P. DUBREUIL et Sylvio CAMPELLO - 1966 - "Normes climatiques et hydrologiques pour projets d'aménagements hydrauliques (Bassin du JAGUARIBE - Ceará - BRESIL)" - ORSTOM.  
Ouvrage traduit en portugais sous le titre :  
"Normas climáticas et hidrológicas" - par le  
P.I.M.N. (SUDENE - DRN) - 1969 - RECIFE.
- P. DUBREUIL, J. HERBAUD, G. GIRARD - "Monographie hydrologique du JAGUARIBE" - Mémoires n° 28 - ORSTOM Edit. - PARIS, 1968.  
Ouvrage traduit en portugais sous le titre :  
"Estudo geral de base do Vale do JAGUARIBE - Vol. V - Monografia hidrológica" - par GVJ (SUDENE - DRN) - RECIFE, 1967.
- HIDROSERVICE (ME 66 A - R9 - 668) - 1968 - "Aproveitamento multiplo do submedio SAO FRANCISCO - Estudo preliminar de alternativas para o aproveitamento do MOXOTO" - pour SUVALE.
- CAEEB-Meco Group - 1968 - "The MOXOTO hydroelectric project" - pour ELETROBRAS.

- ELETROBRAS - 1968 - "Expansão da capacidade geradora do nordeste - Análise a curto e longo prazo".
- P. DUBREUIL - 1969 - "Expertise sur documents du débit minimal du rio SAO FRANCISCO pour l'aménagement de MOXOTO" - SOFRELEC - pour CHESF
- P. DUBREUIL - 1969 - "Expertise sur documents du débit régularisable par le réservoir de SOBRADINHO sur le rio SAO FRANCISCO" - SOFRELEC - pour CHESF
- Inst. Militar de Engenharia - Laboratorio de Mecanica dos Fluidos - 1969 - "Verificação da curva experimental de aferição do vertedor da Usina H.E. de PAULO AFONSO" - Gen. Div. Eng. Leonino Jr - pour CHESF.

- 
- CHESF - Débits journaliers calculés à PAULO AFONSO de 1960 à 1968 (déversoir, vannes et turbines), tableaux et graphiques.
  - SUVALE - Débits journaliers calculés à PETROLANDIA de 1936 à 1968 par HIDROSERVICE (photocopies de Décembre 1969).
  - SUVALE - Hauteurs journalières moyennes à JUAZEIRO de 1929 à 1969 (photocopies de Décembre 1969).
  - CHESF - Programmes HD 01 et HD 02 pour calculs de capacité de réservoir et simulation de fonctionnement du réservoir pour divers débits régularisés (IBM 1130).