

SYMPOSIUM on MAN-MADE LAKES
THEIR PROBLEMS and ENVIRONMENTAL EFFECTS

Knoxville, Tennessee, USA
Mai 1970

INFLUENCE de TRES NOMBREUX PETITS RESEIVOIRS sur
le MODULE ANNUEL d'une RIVIERE TROPICALE
(exemple pris dans le bassin du JAGUARIBE au BRESIL)

par

Pierre DUBREUIL *

et

Georges GIRARD **

* Directeur de Recherches, Chef du Département de la Recherche Appliquée
au Service Hydrologique de l'ORSTOM - France -

** Directeur de Recherches, Service Hydrologique de l'ORSTOM - France -

8146A

ORSTOM
LABORATOIRE D'HYDROLOGIE
DOCUMENTATION

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 39733

Cote : B

13 JUIN 1994

Le Nord-Est du BRÉSIL - 1 millions de km², 20 millions d'habitants - c'est, à la frange côtière près, le polygone des sécheresses parce que le socle cristallin dominant n'offre aucune rétention d'eau possible et que les pluies y sont rares et très variables dans un climat de tendance aride. Une immense politique de réservoirs d'eau d'écoulement est appliquée depuis le début du siècle. A l'occasion des études pour l'aménagement intégré du bassin du JAGUARIBE - Etat du CEARA', 70 000 km² - réalisées par un groupe franco-brésilien, nous avons pu examiner le régime hydrologique régional et l'influence que la politique de réservoirs avait sur ce régime.

1. L'IMPORTANCE des RESERVOIRS

Au même titre que le défrichement des terres (actuellement 23 habitants au km² dans le bassin du JAGUARIBE), la construction des açudes est une entreprise humaine qui s'étale sur tout le XXème siècle, donnant une physiologie sans cesse nouvelle au paysage. L'influence du rythme de construction, c'est-à-dire de la mise en place de capacités d'emménagement croissantes, sur le régime hydrologique est indéniable.

Une estimation du rythme de construction a été réalisée sur documents (archives, photographies aériennes et cartes) et sur le terrain, estimation limitée au bassin du SITIA' (1 790 km²), faible partie (3 %) du bassin du JAGUARIBE.

L'évolution de la capacité d'emménagement pour le bassin du SITIA' apparaît sur le graphique 1 :

- 10 % de la capacité d'emménagement en 1965 était en place avant 1920,
- premier doublement de la capacité de 10 à 20 millions de m³ de 1934 à 1941,

- seconde augmentation importante (croissance de 85 %) de 1955 à 1964, preuve d'un rythme de construction intense dont le ralentissement n'apparaît pas encore avec évidence.

En 1965 pour le bassin du JAGUARIBE, on peut estimer la capacité d'emmagasinement construite à près de 5 milliards de m³ répartis en :

- 1) plusieurs milliers de petits réservoirs ne dépassant jamais quelques centaines de milliers de m³, oeuvre des particuliers propriétaires et exploitants agricoles ; au total, peut-être 200 millions de m³;
- 2) trois à cinq cents réservoirs de moyenne capacité (500 000 à 10 millions de m³ environ) construits soit par des particuliers, soit par des organismes publics, totalisant quelques 500 millions de m³;
- 3) treize grands réservoirs publics de 2 à 185 millions de m³, totalisant 540 millions de m³;
- 4) deux ouvrages de très grande capacité : OROS sur le moyen JAGUARIBE (2 milliards de m³) BANABUIU' sur le cours d'eau du même nom (1,5 milliard de m³).

L'emmagasinement global en 1965 atteint 34 000 m³ (ou 34 mm) par km² pour le SITIA' et 70 000 m³/km² pour le JAGUARIBE.

2. APERÇU CLIMATIQUE et RÉGIME HYDROLOGIQUE

Situé entre les parallèles 4°30 et 8° Sud, le bassin versant du JAGUARIBE ouvert sur la mer et peu accidenté devrait jouir d'un climat à tendance équatoriale maritime ; mais le régime très particulier des masses d'air dans le Nord-Est brésilien impose à la pluviométrie un cycle tropical court, sujet à des écarts élevés d'une année sur l'autre, conduisant ainsi le climat à revêtir un aspect semi-aride.

Le régime pluviométrique est du type tropical a une saison pluvieuse d'été austral concentrée sur six mois avec un maximum unique en Mars ou Avril. La répartition mensuelle des pluies est d'une très grande variabilité. L'irrégularité interannuelle de la pluviosité totale annuelle (700 mm) est caractérisée par un coefficient de variation élevé de 0,37.

Les températures moyennes mensuelles de l'air se situent entre 25 et 28°C tout au long de l'année; les températures minimales moyennes mensuelles oscillent entre 19° et 24°C, les températures maximales correspondantes entre 29 et 34°C.

La hauteur d'eau annuelle évaporée d'une nappes d'eau libre représente sous ce climat environ trois fois la hauteur des précipitations annuelles. Les répartitions mensuelles des évaporations mesurées sur bac WEATHER BUREAU de classe A, sur bac flottant et sur nappes d'eau libre sont bien connues; la variabilité autour de leur moyenne oscille de 8 % en saison sèche à 20 % en saison des pluies. A l'échelle annuelle, la variabilité n'atteint que 10 %. La hauteur d'eau moyenne évaporée annuellement sur une retenue dans le bassin du JAGUARIBE a été évaluée comme variant de 2 100 mm pour une profondeur maximale de 20 m à 2 600 mm pour une profondeur maximale de 4 m. En période sèche de Juin à Décembre, cette évaporation varie de 1 350 à 1 700 mm selon la profondeur maximale de la retenue.

Avec un tel climat semi-aride et irrégulier pour les précipitations, le régime hydrologique du bassin du SITIA ne peut être que très irrégulier : certaines années ont un écoulement très abondant avec crues et inondations, d'autres ne donnent lieu qu'à des écoulements limités dans le temps et à une faible partie du bassin, parfois même il n'y a pas d'écoulement.

La lame moyenne observée interannuelle pour ce régime (72 mm pour le SITIA) est toujours supérieure au double de la lame annuelle médiane et l'irrégularité interannuelle des écoulements reste des plus importantes (coefficient de variation supérieur à 1). Après ajustement de la loi de GALTON aux lames annuelles observées classées, on peut estimer que la lame décennale sèche serait de 1 à 2 mm tandis que la lame décennale humide serait de 200 à 220 mm.

La répartition mensuelle de l'écoulement est en moyenne la suivante (exprimée en % de la lame annuelle) :

Janv	Févr	Mars	Avr.	Mai	Juin
5,5	24,5	42,5	22,5	4,5	0,5

Les autres mois sont secs. L'irrégularité interannuelle est encore plus grande qu'à l'échelle annuelle.

3. ANALYSE de l'INFLUENCE des RESERVOIRS sur l'ECOULEMENT

Pour tenter de préciser l'influence d'un ensemble de réservoirs, parfois implantés en cascade, les uns après les autres le long d'un thalweg, sur l'écoulement annuel, on a procédé du simple au complexe en considérant d'abord un réservoir unique, puis les cas extrêmes de réservoir vide et plein en fin de saison d'écoulement, puis en généralisant au bassin du SITIA l'influence des principaux réservoirs de son bassin.

3.1. Effet d'un réservoir

Tant qu'une retenue ne déverse pas, l'écoulement d'entrée (l'apport du bassin amont) ne participe pas à l'écoulement de sortie (apport général observé en aval). La durée de cette absence de participation et l'importance de l'écoulement de sortie par rapport à l'écoulement d'entrée dépendent de deux critères :

- a) la lame maximale d'emménagement L_m , quotient de la capacité maximale du réservoir par la surface du bassin,
- b) la lame compensatrice d'évaporation E_c , quotient de la surface maximale évaporante du réservoir par la surface du bassin.

Si l'on admet, comme c'est le cas dans le bassin du SITIA' (ou du JAGUARIBE), que les pertes par filtration et la consommation des gens et des troupeaux sont négligeables devant l'évaporation, l'écoulement de sortie du réservoir existe seulement si l'écoulement d'entrée est supérieur à E_c (réservoir plein en fin d'année hydrologique précédente) on a une valeur croissante jusqu'à L_m (réservoir vide en fin d'année hydrologique précédente).

3.2. Effet de plusieurs réservoirs

Si ces réservoirs sont en parallèle sur des thalwegs voisins, leurs effets indépendants s'ajoutent pour composer la modification finale de l'écoulement de sortie du bassin. Si ces réservoirs sont en cascade sur un même cours d'eau, leurs critères L_m et E_c variables et les précipitations variables sur leurs propres bassins d'alimentation combinent de manière complexe leurs effets non indépendants.

Sur le bassin du SITIA', les superficies contrôlées respectivement par un, deux, trois et plus de trois réservoirs en cascade sont de 53 - 18 - 4,4 et 1,4 % de la superficie totale. La capacité maximale d'emmagasinement est de 61,5 millions de m³. Pour reconstituer l'effet de tous ces réservoirs, on a fait l'hypothèse simplificatrice de l'homogénéité de l'écoulement sur l'ensemble du bassin.

3.2.1. Effet minimal :

Il correspond au cas de l'année n+1 succédant à une année abondante n au cours de laquelle tous les réservoirs ont déversé, et sont donc pleins en début de saison sèche (entre n et n+1). Dans ce cas, les réservoirs prélèveront en début d'année n+1 un volume équivalent aux lames compensatrices d'évaporation E_c de chacun d'eux. Au total pour le bassin du SITIA', en 1965, l'évaporation de 1 500 mm sur 21,7 km² de surfaces évaporantes des réservoirs correspond à un volume de 32,6.10⁶ m³ (53 % de la capacité totale d'emmagasinement du bassin), équivalent à une lame de 18 mm (34 mm sur le bassin contrôlé par les réservoirs). Cette lame est prélevée quand le réservoir ayant la plus forte valeur de E_c déborde. L'écart entre lame observée L_o en aval du SITIA' et lame naturelle L_n varie donc de 18 mm à 0 mm au fur et à mesure que l'apport aux réservoirs diminue et que les différents réservoirs, à valeur E_c décroissante, sont susceptibles de déverser. Sur le graphe B, la courbe OP exprimant L_n en fonction de L_o croît de 0 à A point où $L_n = L_o + 18$, et est tangente en O à la droite OK représentant le pourcentage du bassin non soumis aux réservoirs (calculé sur l'angle entre abscisse et bissectrice du graphe).

3.2.2. Effet maximal :

Il correspond au cas d'une année $n+1$ rencontrant tous les réservoirs vides en fin de saison sèche précédente. Au total en 1965 pour tout le SITIA, cela équivaut à $62,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de volume emmagasiné total, soit 35 mm de lame équivalente (66 mm sur le bassin contrôlé par les réservoirs), lame égale à la médiane des lames observées. Ce prélèvement maximal de 35 mm n'est effectif que lorsque le barrage ayant la plus grande lame d'emmagasinement L_m est rempli. Le prélèvement diminue de 35 mm vers zéro si la lame observée diminue, et sa valeur dépend du classement des réservoirs par ordre décroissant de L_m . A l'extrême la courbe OV est tangente également à OK et à partir du point B, elle devient la droite $L_n = L_0 + 35 \text{ mm}$ (graphe B).

3.2.3. Effet quelconque

Le graphe B, donnant la liaison entre lame observée L_0 et lame naturelle L_n , peut s'établir pour chaque courbe limite (effet minimal, effet maximal) point par point après avoir classé les réservoirs par valeurs décroissantes de E_0 et L_m et en calculant pour chacun la lame observée (égale à la lame d'entrée dans l'hypothèse faite d'homogénéité de l'écoulement sur tout le bassin) correspondante.

La lame naturelle d'une année quelconque $n+1$ est donc comprise entre $L_0 + \Delta$ et $L_0 - \Delta$ selon le degré de remplissage des réservoirs (supposé homogène dans tout le bassin) à la fin de l'année n . Ce degré de remplissage (ou plutôt son inverse) est représenté sur le graphe B par le segment FE séparant la courbe CV de la droite d'ordonnée L_0 ; il s'exprime par le rapport FE/L_0 et varie de zéro (réservoirs pleins), quand L_0 est supérieure à la valeur correspondant au point B, à 1 (réservoirs vides), quand L_0 a la valeur minimale L_{0n} .

(proche de 18 mm) telle que FE devient GZ (Z abscisse de la tangente à OV en B). La courbe de l'année n+1 (qui dépend du remplissage en fin d'année n) est intermédiaire entre OV et OP et passe par un point H situé sur DC à une distance de D telle que $\frac{DH}{DC} = \frac{FE}{L_0}$.

Les paramètres Δ et Δ' de passage entre L_0 et L_n variant avec L_0 , en croissant depuis 0 jusqu'à des maximums égaux respectivement à 18 mm et 35 mm lorsque L_0 dépasse les valeurs correspondant à la lame compensatrice d'évaporation E_c maximale (point A de OP) et à la lame maximale d'emmagasinement L_n (point B de OV).

4. COMPARAISON des LAMES ANNUELLES OBSERVEES et NATURELLES du SITIA'

Le graphe B permet d'évaluer la lame naturelle annuelle écoulée à partir de la lame observée et de l'état de remplissage des retenues pour la période 1957-1965 au cours de laquelle le volume total d'emmagasinement des retenues est resté relativement stable. Il n'en est pas de même pour les années antérieures, aussi avons-nous tracé un autre faisceau de courbes en admettant pour la période 1943-1957 un volume total emmagasiné dans le bassin moitié de celui de 1964 et des pertes annuelles proportionnellement plus fortes étant donné que les retenues anciennes étaient moins profondes.

Avant 1943, le nombre de retenues et le volume emmagasinable étaient faibles ; l'écart entre la lame observée et la lame naturelle ne dépassait pas 5 mm, aussi les lames naturelles ont été déduites directement des lames observées en tenant compte de la succession des lames annuelles.

Sans être très rigoureuse (hypothèses d'homogénéité des écoulements et des degrés de remplissage), cette méthode a permis de reconstituer, pour la période 1923-1965, les lames naturelles ou lames d'eau qui se seraient écoulées s'il n'y avait pas eu de retenues dans le bassin versant du SITIA'.

L'influence exacte des réservoirs ne peut être clairement mise en évidence que si l'on s'affranchit de la chronologie de construction des ouvrages. On peut ainsi constituer à l'aide du seul graphe B, fonctionnant à l'envers pour la période antérieure à 1957, la série complète et homogène des lames d'écoulement que l'on aurait observé depuis 1923 si le degré de construction atteint en 1965 l'avait été dès cette époque.

Cette série de lames L_{65} est comparée aux deux autres séries L_0 et L_n à l'aide des paramètres caractéristiques, dans le tableau ci-dessous :

Série de lames (1923-65)	L_0	L_n	L_{65}
Médiane	35	47	30
Moyenne	72	81	60
Ecart-type	87	89,4	-
Coefficient d'asymétrie	3,65	3,12	-
Quantile quinquennal	97	116	96
Quantile quinquennal	11	15	8

La présence des réservoirs dans le bassin du SITIA accroît la dissymétrie de l'écoulement annuel et par le biais de l'évaporation en diminue l'importance et d'autant plus que l'année est sèche ; l'aridité apparente du régime hydrologique augmente.

Cette action déjà nette dans le déroulement chronologique de 1923 à 1965 est encore plus marquée dans la situation de 1965 qui préfigure au mieux l'avenir si le rythme des constructions cesse :

- la médiane naturelle est réduite de 25 (L_0) et de 36 % (L_{65}),
- la moyenne naturelle est réduite de 11 et de 24 %,
- l'écoulement de récurrence 5 ans diminue de 17 % en année abondante, mais de 27 à 47 % en année sèche.

CONCLUSION

L'influence de très nombreux petits réservoirs sur le module annuel d'une rivière tropicale a été nettement montré par l'exemple du SITIA, bassin dans lequel les réservoirs ont une capacité d'emmagasinement de 34 mm soit 42 % du module moyen. L'usage d'une méthode graphique simple s'est révélé satisfaisant, malgré les quelques incertitudes qu'elle comporte. Quant à vouloir être plus précis ou à juger réellement de l'efficacité de ces réservoirs, seule une simulation de gestion intégrée de tous les ouvrages du bassin pourrait y satisfaire.

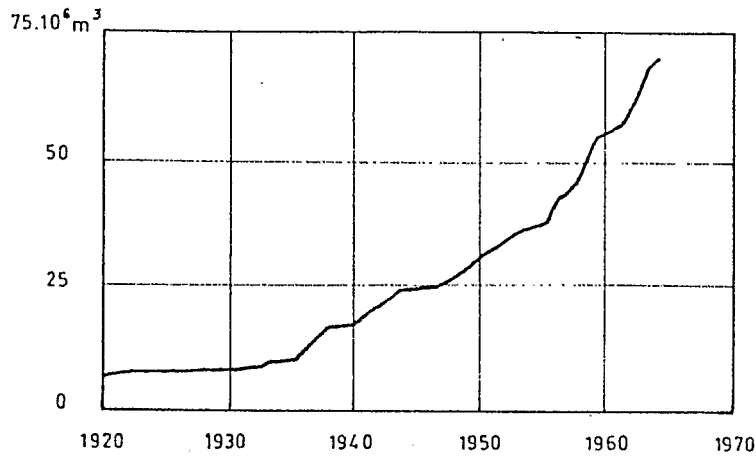
x
x x x
x

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

P. DUBREUIL, G. GIRARD, J. HERBAUD - 1968 - "Monographie hydrologique du bassin JAGUARIBE (CEARA-BRESIL)".
385 p. - Mémoires ORSTOM, n° 28, PARIS -

Évolution de la construction d'açudes dans le bassin de SITIÁ

Gr. A



Influence des retenues sur la lame écoulee du SITIÁ

(Situation en 1965)

