

UN EXEMPLE D'ESTIMATION SUR CARTE DU VOLUME TOTAL EMMAGASINÉ DANS LES PETITS RÉSERVOIRS D'UNE RÉGION

Pierre DUBREUIL (France) *

RÉSUMÉ

Comment évaluer les ressources en eau emmagasinées dans les dizaines de milliers de petits réservoirs existants dans le Nord-Est du Brésil? A partir d'un échantillon de 200 réservoirs dont toutes les caractéristiques au sol sont connues, on établit des relations permettant d'éliminer les facteurs «hauteur de retenue» et «formes du thalweg». On peut alors calculer les volumes emmagasinés au seul examen de la surface du réservoir et de la longueur du bassin versant observées sur la carte.

Sur le volume total, l'erreur à craindre ne doit pas excéder 25%.

ABSTRACT

Using maps to estimate the total water storage of little reservoirs of a region

How to appraise the water stored in the tens of thousands of little reservoirs existing in the Brazilian north-eastern region? From a 200 reservoirs sample all physical characteristics of which are known, it is possible to set relations in order to eliminate the factors "pool depth" and "thalweg forms". Then the storage capacities can be calculated from the pool surface and drainage basin length, both measured on maps.

On the total volume, the error is not expected to exceed 25%.

Le Nord-Est du continent sud-américain abrite, au Brésil, le polygone de la sécheresse qui couvre 1 150 000 km² et dans lequel vivent de 17 à 18 millions d'habitants (voir carte de situation).

Malgré sa position géographique subéquatoriale (entre 3° et 13° de latitude Sud), cette région est soumise à un régime des pluies très irrégulier; le régime très particulier des masses d'air au-dessus de cette région et la présence d'une chaîne montagneuse parallèle à la cote orientale expliquent l'aridité relative du climat.

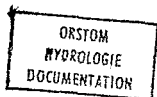
Concentrés sur moins de 5 mois, de novembre à juin selon la latitude, les jours de pluies — souvent de courts orages violents — au nombre de 35 à 95 (dont 10 à 30 reçoivent plus de 10 mm) fournissent en moyenne 400 à 1000 mm de hauteur annuelle. Mais cette pluviosité est très irrégulière; le rapport des déciles varie entre 2,5 et 5; des années de moins de 200 à 400 mm suivant la région ne sont pas rares; leur agglutination par paquets et leur pseudo-périodicité de retour ont engendré la grande peur de la soif dans le polygone de la sécheresse.

Les terrains cristallins anciens imperméables (granites schistes, gneiss...) recouverts d'un sol peu épais occupent plus des 4/5 du polygone. Il n'y a de ressources en eau que la pluie et le ruissellement. Depuis la fin du siècle dernier, partout se dressent des digues en terre pour accumuler l'eau, des petites retenues de quelques milliers de m³ jusqu'aux grands réservoirs de plusieurs milliards de m³.

Ces retenues, que l'on appelle communément des açudes au Brésil du Nord-Est, peuvent être classées en 3 catégories :

- a) Les açudes publics construits par un organisme fédéral, étatique ou communal sont généralement de grande capacité et leurs caractéristiques hydrauliques sont bien connues car des projets étudiés en sont à l'origine;
- b) Les açudes privés construits par des particuliers isolés ou associés sont de petite capacité et leurs caractéristiques hydrauliques sont inconnues;

* Directeur de recherches à l'ORSTOM.



80150

c) Les açudes construits par des particuliers en coopération (surtout financière et parfois technique) avec un organisme public, doivent avoir plus de 4 m de hauteur et une capacité supérieure à 150 ou 300 000 m³ suivant les régions; leurs caractéristiques hydrauliques sont connues car un projet est établi avec l'aide de l'organisme public prêteur, mais il faut se méfier des modifications susceptibles d'intervenir en cours de réalisation.

Actuellement dans le polygone de la sécheresse, les catégories *a* et *c* groupent près de 1000 ouvrages dont la capacité de retenue dépasse 16,5 milliards de m³. Parmi eux, plus de 40 açudes dépassent 20 millions de m³ chaque, représentant 75% de l'emmagasinement total (à lui seul OROS sur le JAGUARIBE peut retenir de 2 à 4 milliards de m³).

Mais à côté le nombre et la capacité des açudes privés de la catégorie *b* restent entièrement inconnus; il n'existe aucun recensement complet car il n'y a pas obligation légale en la matière.

Dans l'état du CEARA, le bassin du JAGUARIBE que nous avons plus particulièrement étudié contient plus de 10 000 açudes sur 70 000 km². Bien que leur répartition géographique soit très variable avec la densité d'habitat, la qualité des sols et la pluviosité, on peut sans risque d'erreur parler de plusieurs dizaines de milliers (près de 100 000 vraisemblablement) d'açudes privés de petite capacité dans le polygone de la sécheresse.

Leur capacité est inconnue. Un sondage effectué sur un échantillon de 160 retenues privées de moins de 500 000 m³ dans un sous-bassin du JAGUARIBE a donné les résultats suivants :

73 açudes entre	3500 et	50 000 m ³
21 açudes entre	50 et	100 000 m ³
42 açudes entre	100 et	300 000 m ³
24 açudes entre	300 et	500 000 m ³

La capacité moyenne se situe ici à 80 000 m³ environ. Elle ne paraît pas susceptible de pouvoir descendre en-dessous de 10 000 m³ en d'autres bassins. Pour l'ensemble du polygone de la sécheresse, on ne peut donc avancer qu'une fourchette (beaucoup trop large) de 1 à 8 milliards de m³ pour estimer la capacité d'emmagasinement des açudes privés.

Une telle estimation est insuffisamment précise pour la connaissance du rôle que jouent les açudes privés de petite capacité sur l'écoulement «naturel» aval qui alimente les grands ouvrages publics.

Le pourcentage vraisemblable d'accumulation des petits açudes vis-à-vis des ouvrages publics ou en coopération est loin d'être négligeable; il peut même être prépondérant dans un sous-bassin démuné d'une retenue de plus de 20 millions de m³.

Dans le cadre de l'aménagement intégré du bassin du JAGUARIBE nous avons été amené à rechercher le meilleur moyen de préciser cette influence des petits açudes sur l'écoulement et le bilan hydrique; l'estimation du nombre et de la capacité globale de ces retenues en était la condition sine qua non.

La méthode proposée à cette intention, si elle donne satisfaction, pourrait être ultérieurement appliquée à l'ensemble du polygone de la sécheresse et permettre ainsi d'en évaluer plus précisément la capacité d'emmagasinement en eau. Une telle évaluation entre d'ailleurs dans les préoccupations du Conseil de Coordination de la Décennie hydrologique internationale (UNESCO), formulée lors de sa première session en 1965 (thème du bilan hydrique mondial, 6° et 7° résolutions).

LA MÉTHODE PROPOSÉE

Procéder au recensement par enquête de terrain est une opération impossible. Le seul moyen de recensement rapide efficace et sûr est l'emploi des photographies

aériennes récentes à échelle du 1/50 000^e environ — elles étaient disponibles. De la sorte ou appréhende seulement le nombre, la position et deux dimensions de la forme des retenues.

Pour déterminer la capacité d'une retenue à l'aide de ces seules deux dimensions. Il faut s'affranchir de la troisième que représente la hauteur de l'ouvrage. Dans une région géomorphologique homogène, les formes de thalwegs sont peu variables et l'on peut espérer trouver certaines relations entre les divers paramètres de ces formes (hauteur, largeur, longueur...) desquels dépend en partie la hauteur, à laquelle on peut édifier une retenue, dans de tels thalwegs.

La marche à suivre était ainsi tracée :

- tout d'abord exprimer la capacité d'un réservoir en fonction de sa hauteur et des formes visibles en plan sur photographie aérienne;
- rechercher une liaison entre la hauteur de retenue et des paramètres de forme de thalwegs également visibles sur plan.

Une enquête complète sur le terrain devait fournir les caractéristiques hydrauliques de retenue et géomorphologiques de bassin versant pour un échantillon suffisamment grand d'açudes afin que les relations déduites puissent prétendre à une certaine validité; elle a concerné environ 200 petits réservoirs d'un sous-bassin de 2000 km² à l'intérieur du JAGUARIBE.

EXPRESSION DE LA CAPACITÉ D'UN PETIT RÉSERVOIR

Quelle que soit l'époque à laquelle a été prise une photographie aérienne, la surface maximale occupée par l'eau d'une retenue y est nettement visible. La trace en plan de cette surface, quand il s'agit d'un petit réservoir, est assez régulière et peut s'inscrire dans une forme schématisée géométrique. La figure 1 montre les 3 types de forme avec les variantes selon que la retenue intéresse un ou deux thalwegs, dans lesquelles s'inscrivent aisément la plupart des retenues naturelles examinées. Les types A et B ne sont que des formes simplifiées du type général C ; leur existence ne doit pas étonner car l'implantation d'une digue en terre dans une petite exploitation agricole se fait au plus près sur le thalweg voisin sans recherche de section rétrécie, ce qui est d'ailleurs très rare sur les petits cours d'eau concernés, pris en tête de bassin.

En utilisant les notations portées sur la figure 1 pour caractériser les dimensions des surfaces de retenues, et en appelant h_m la hauteur maximale de celle-ci, le volume maximal emmagasiné se calcule aisément à l'aide d'une formule de la forme suivante :

$$V_m = A \quad L_m \quad l_{bm} \quad h_m \quad (1)$$

La valeur et l'expression du coefficient A dépendent de la forme de la surface de la retenue et de la forme du thalweg. On a fait 2 hypothèses sur celle-ci :

- une hypothèse rectiligne dans laquelle le profil en long dans la retenue est une droite et le profil en travers un triangle à sommet dans l'axe du thalweg, le volume s'explicitant alors comme une demi-pyramide (type A) où la somme de 2 demies pyramides de base commune — la section critique — et dont l'une est tronquée selon l'axe du barrage (types B et C);
- une hypothèse ellipsoïdale dans laquelle la retenue est assimilée à un demi-ellipsoïde tronquée selon le plan du barrage, profils en travers et en long étant des ellipses.

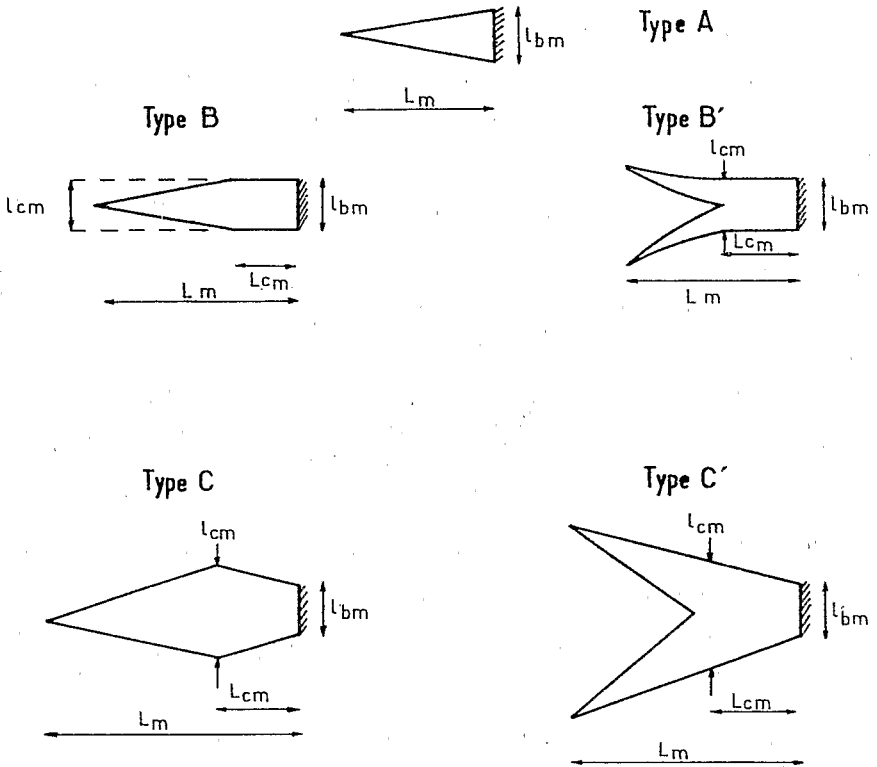
Pour les açudes recensés lors de l'enquête de terrain et dont la capacité était connue, on a comparé la valeur expérimentale du coefficient A et celles déduites des hypothèses de calcul. Il s'est avéré que le coefficient A de l'hypothèse rectiligne était très proche de sa valeur expérimentale et que leur rapport moyen était l'unité, pour l'échantillon étudié.

Bien que ce rapport puisse différer quelque peu de l'unité pour d'autres régions géomorphologiques, on ne doit pas s'attendre à une grande variation de sa part dans le polygone de la sécheresse.

Fig-1

FORMES SCHÉMATISÉES DE LA PLUPART DES PETITS RÉSERVOIRS

(Vues en plan sur photographie aérienne)



- l_{bm} Largeur maximale du barrage en crête.
- L_m Longueur maximale de la retenue.
- l_{cm} Largeur critique maximale à la section la plus large de la retenue.
- L_{cm} Distance maximale du barrage à la section. " "

L'hypothèse ellipsoïdale est rejetée car son coefficient A supérieur de π au moins à celui de l'hypothèse rectiligne s'éloigne par trop des conditions régionales.

L'hypothèse rectiligne satisfaisante permet le calcul de la capacité d'un açude en appliquant la formule :

$$V_m = \frac{1}{6} (K+K') L_m \cdot b_m \cdot h_m \quad (2)$$

avec $K = l_{cm}/L_m$ et $K' = l_{cm}/b_m$, 2 paramètres caractérisant la forme de la retenue par la position (K) et l'ampleur (K') de la section critique la plus large, le premier K variant de 0 (type A) à 0,6—0,7 au plus et le second K' de 1 (types A et B) à 3 ou 4 au plus.

Liaison entre la hauteur de la retenue, la longueur et la surface du bassin

Pour éliminer h_m de la formule (2), on a analysé les éléments morphologiques fournis par l'enquête sur le terrain.

Dans un premier stade, on a comparé la hauteur de retenue successivement avec les paramètres suivants : capacité, surface maximale, longueur maximale, largeur du barrage. La meilleure relation a été trouvée de loin avec la longueur maximale L_m ; on a calculé les médianes et les intervalles interquartiles par classes de L_m afin d'explicitier la forme de variation de h_m . La figure 2 montre le résultat, il est encore insuffisamment précis. En effet, une grande dispersion subsiste du fait que l'on n'a pas tenu compte de la position du barrage dans le bassin; il est évident que la relation $h_m = f(L_m)$ dépend de celle-ci, par la pente du thalweg principalement.

Dans l'hypothèse rectiligne admise, la pente du thalweg $tg i$ est telle que : $h_m = L_m tg i$; cette pente varie aussi en raison inverse de la surface S du bassin versant en amont de la retenue. L'examen de l'échantillon disponible a montré que pour garder une gamme de variation numérique semblable entre $tg i$ et S , il fallait considérer la racine cubique de celle-ci, c'est-à-dire prendre : $tg i = f(S^{-3})$.

On a alors considéré que la mesure de la surface était une opération un peu longue à laquelle il serait préférable de substituer celle d'une longueur, de la plus grande longueur du bassin versant en amont de la retenue, mesurée depuis la digue jusqu'à la ligne de crête la plus éloignée en ligne droite, ou légèrement brisée si la forme du bassin l'exige pour la vraisemblance. Cette longueur L étant de la forme $S^{\frac{1}{2}}$ on a donc en définitive : $tg i = g(L^{-2,3})$.

Cette hypothèse conduit à rechercher une relation entre h_m et le produit $L_m \cdot L^{-2,3}$.

Ce qui fut fait sur l'échantillon de 200 açudes et conduisit au résultat représenté sur la figure 2, résultat considéré comme satisfaisant puisque les bornes de l'intervalle interquartile (50% des valeurs h_m) calculées pour diverses tranches de $L_m \cdot L^{-2,3}$ ne sont pas éloignées de $\pm 25\%$ des moyennes de h_m pour ces mêmes tranches.

On a pu ajuster une fonction algébrique à la série des moyennes, après report des points en coordonnées logarithmiques. On obtient par le calcul l'expression suivante :

$$h_m = 0,26 (L_m \cdot L^{-2,3} - 92)^{0,62}$$

On peut retenir la forme simplifiée suivante qui n'apporte pas d'imprécision supplémentaire :

$$h_m = \frac{1}{4} (L_m \cdot L^{-2,3} - 100)^{2,3} \quad (3)$$

La conjugaison des formules (2) et (3) permet d'explicitier la capacité maximale de retenue en fonction des seuls paramètres de surface, visibles sur photographie

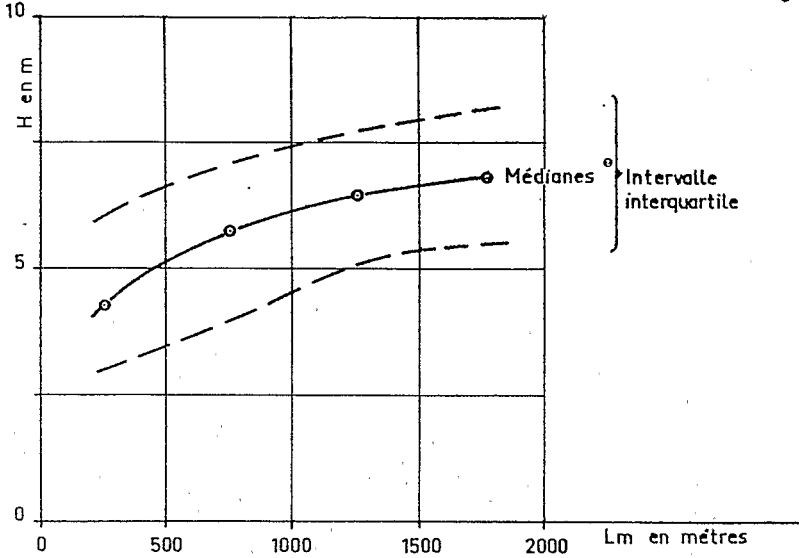
aérienne :

$$V_m = \frac{1}{24} (K+K') L_{bm} \cdot l_m \cdot (L_m \cdot L^{-2,3} - 100)^{2,3} \quad (4)$$

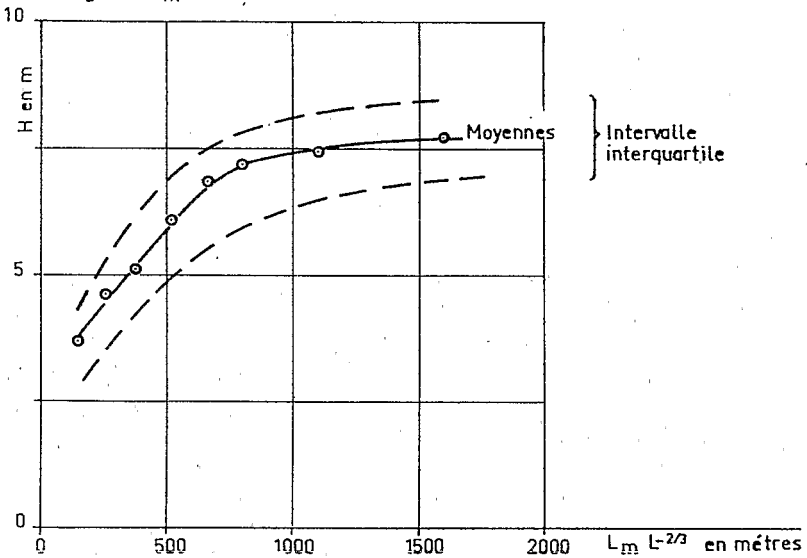
RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR DE RETENUE ET D'AUTRES PARAMÈTRES

① Avec la longueur maximale L_m de retenue

Fig-2



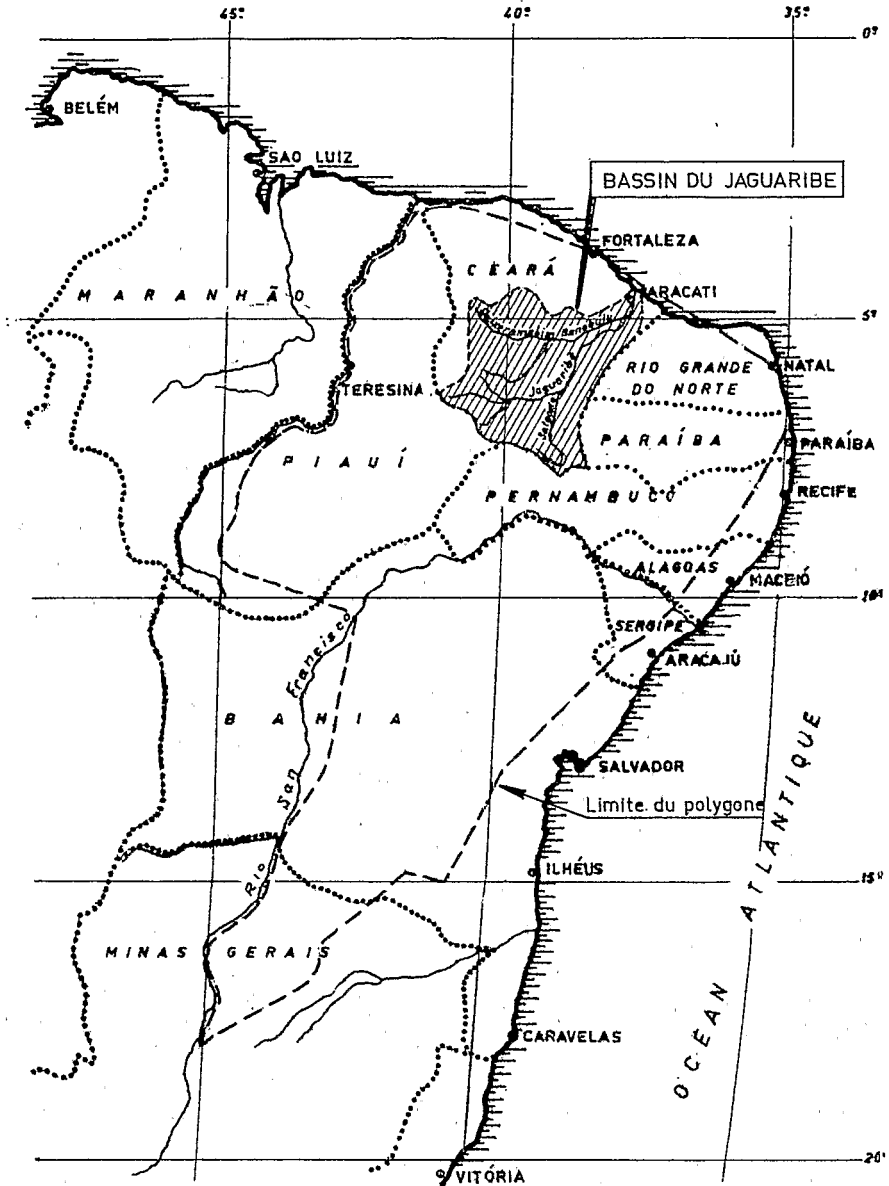
② Avec la longueur L_m de la retenue et L du bassin



LE POLYGONE DE LA SÈCHESSÉ AU NORD-EST DU BRÉSIL

Corte de situation

échelle : 1/10 000 000



CONCLUSION

L'application de cette formule n'offre pas de grandes difficultés. On peut pour la rendre plus rapide établir une table de calcul de $L_m \cdot L^{-2,3}$ à partir des valeurs de L_m et L les plus probables, puis tracer un abaque de calcul de $(L_m \cdot L^{-2,3} - 100)^{2,3}$ en fonction du 1er terme ainsi calculé. La multiplication par

$$\frac{1}{24} (K + K') L_m \cdot l_{bm}$$

s'effectue ensuite.

Les photographies aériennes ou plus exactement le photo-plan redressé que l'on peut en extraire permet de déterminer aisément pour appliquer cette formule L_m , l_{bm} , K , K' et L .

La relation (4) a été mise au point à partir des données d'un sous-bassin du JAGUARIBE constitué de terrains cristallins variés (migmatites granitiques, quartzites micaschistes). Il est probable que pour d'autres terrains et d'autres régions les formes géomorphologiques changent et que l'ajustement des relations (3) et (4) exige de nouveaux sondages de terrain. Ceux-ci peuvent être limités et peu coûteux.

La méthode proposée ne prétend pas permettre le calcul précis de la capacité d'un açude déterminé, mais elle peut permettre le calcul de la capacité globale de plusieurs centaines (ou milliers) de petits réservoirs d'une même région. Il est certain que sur ce grand nombre, certaines anomalies bien compréhensibles se compenseront et que le résultat ne sera pas entaché d'une erreur à craindre supérieure à 25%.

Une telle précision nous paraît satisfaisante pour résoudre les problèmes posés par la présence de ces petits açudes : rôle d'emménagement au niveau du bilan hydrique régional, rôle modérateur de l'écoulement sur le bassin, en aval, problèmes qui se traitent correctement avec la seule connaissance du nombre et de la capacité globale des retenues.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- R. PIOGER, «Hydrologie et géométrie comparées des réservoirs du Nord-Est» in *Ressources en eau du Nord-Est du Brésil — Les eaux fluviales*, F.A.O. — RECIFE 1964, 167 p., 40 graph.
- P. DUBREUIL, G. GIRARD et J. HERBAUD, «Monographie hydrologique du bassin du JAGUARIBE», 3 volumes 21 × 31, 411 pages, 76 graph., 7 cartes. ORSTOM, Paris. Avril 1965 (SCET-Cooperation, Sudene).