

Influence de la taille et du nombre de retenues sur le régime hydrologique de petits bassins du Nordeste du Brésil

Eric CADIER

Chargé de recherche ORSTOM, Récife (Brésil)

Pierre DUBREUIL

Directeur de recherche, ORSTOM, Paris

Résumé

Dans les régions semi-arides du globe, la construction des retenues d'eau s'est considérablement accrue au 20^e siècle. Le régime hydrologique en aval en est fortement affecté. La ressource en eau est l'objet de conflits entre usagers. Les cultures montrent l'influence globale de nombreuses petites retenues sur l'eau disponible en aval. L'emploi d'un modèle mixte hydrologique et de simulation leur permet d'analyser en détail cette influence et le rôle joué par la taille du bassin versant, le volume accumulé dans une retenue et la surface de périmètres irrigués. La démonstration est faite sur des exemples concrets pris dans le Nordeste du Brésil.

I. Introduction

Une retenue sur un cours d'eau ampute d'autant plus l'écoulement en aval que sa capacité d'emmagasinement est grande et lamine les crues. Ceci est banal.

Dans les régions semi-arides du globe, il n'y a de vie humaine et de développement agro-pastoral qu'en présence d'eau. Celle-ci est toujours en quantité suffisante. Son accumulation en réservoirs est naturelle. Elle atteint des proportions considérables dans les zones à substratum cristallin où l'eau souterraine est rare et malaisée à extraire.

L'influence de nombreuses retenues sur les ressources en eau disponibles en aval devient importante, primordiale. La faisabilité de grands aménage-

Abstract

During the 20th century, the construction of water reservoirs had a considerable increase in the semi-arid regions of the world. The hydrological regime has been strongly influenced downstream. There is conflict between users of water resources. The authors have pointed out the global impact of numerous small reservoirs upon the water available downstream. They also run a hydrological and simulating model to scrutinize this impact. This modeling allows to show and to quantify and of the irrigated areas. The application has been made on actual cases selected in northeastern part of Brazil.

ments peut en dépendre. Il y a conflit d'eau entre amont et aval. Les planificateurs et les décideurs ont un choix difficile à faire. Celui-ci dépend de considérations hydrologiques mais également économiques (les périmètres irrigués produisent les cultures vivrières indispensables) et sociales (survie et maintien sur la terre du petit exploitant près de la petite retenue).

Des grandes régions semi-arides, Inde, Sahel africain, Nordeste brésilien, nous avons choisi la dernière pour illustrer l'influence de petits réservoirs sur la ressource en eau, une politique systématique d'identification de ceux-ci y étant appliquée depuis près d'un siècle.

Après avoir montré l'influence globale de nombreux petits réservoirs sur le régime hydrologique,

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

N° : 39 690

Cote : B

L11.1

81 252

1 3 JUIN 1994

nous présenterons un modèle hydrologique de simulation permettant d'aller plus loin dans l'analyse de cette influence et de fournir des éléments d'appréciation aux aménagistes régionaux, arbitres (?) des conflits entre amont et aval, entre petits et grands réservoirs.

2. Influence globale de nombreuses retenues

La zone semi-aride du Nordeste du Brésil, appelée polygone des sécheresses, couvre 900 000 km². P. DUBREUIL et G. GIRARD (1968, 1971), ont analysé le régime hydrologique d'un grand bassin de cette zone, celui du Jaguaribe -70 000 km²-, et déterminé l'influence des retenues sur ce régime.

Des densités de 10 à 20 retenues pour 100 km² y sont courantes. Plusieurs milliers de petits réservoirs, de capacité inférieure au million de m³, et plusieurs centaines de moyens réservoirs (1 à 100 millions de m³) y ont une capacité maximale d'emmagasinement équivalente à 18 mm de lame annuelle d'écoulement. Or celle-ci a une valeur moyenne de 30 à 40 mm. La ponction est énorme. Sur un bassin-test de 2000 km², une analyse fine de cette influence montre qu'elle conduit non seulement à réduire l'eau disponible en aval mais également à accroître cette réduction lors des années sèches déficitaires. Au cours d'une période de 40 ans d'observation des débits, durant laquelle l'évolution de la construction des retenues est connue (elle passe de 5 à 75 millions de m³), deux séries de modules annuels sont reconstitués, la première "série naturelle" est celle qui serait observée sans réservoir, la seconde "série influencée" est celle correspondant à 75 millions de m³ de retenue durant 40 ans. La série naturelle a un module médian de 47 mm et quinquennal faible de 15 mm. Les valeurs correspondantes pour la série influencée sont de 30 et 8 mm.

Globalement, un grand nombre de petits réservoirs diminue la quantité d'eau disponible, accroît l'irrégularité du régime hydrologique et l'aridité apparente de celui-ci.

Des réservoirs et petits barrages de toutes tailles font maintenant partie du paysage de la plus grande partie du Nordeste brésilien. Le nombre de ces réservoirs (açudes) est compris entre 50 000 et 100 000, suivant la taille minimale considérée. On a assisté ces dernières années à une véritable prolifération de ces açudes qui a concerné surtout les plus petits réservoirs.

Paradoxalement ces barrages construits pour combattre les effets de la sécheresse ne sont pratiquement pas utilisés pour l'irrigation. Les habitants se limitent généralement à utiliser cette eau pour leur consommation et celle de leur bétail : 99 % de l'eau stockée est finalement perdue par évaporation et l'infiltration.

3. Modélisation hydrologique et de simulation des retenues.

S. CAMPELLO (1979) avait élaboré plusieurs modèles hydrologiques globaux reconstituant à partir des pluies les débits journaliers de petits bassins versants du Nordeste (15-70 km²).

En dressant l'inventaire complet par télédétection des réservoirs d'un grand bassin et en utilisant une analyse de la géométrie de ceux-ci (P. DUBREUIL, 1966), on peut constituer une banque de données des capacités et autres caractéristiques des dits réservoirs. Grâce à une telle banque et à un modèle hydrologique à discrétisation spatiale, on peut préciser en tout point de cours d'eau d'un grand bassin, l'influence des réservoirs d'amont sur le régime hydrologique au niveau de la série pluvioannuelle continue des débits mensuels et même prévoir l'impact de tout nouvel ouvrage projeté. L'application au bassin de l'Acarau, 20 000 km² (Barboza De Oliveira, 1982) a été faite et a confirmé la nature et l'ampleur de l'influence globale observée sur le Sitiã (cf. 2).

La modélisation présentée ici emploie un modèle mixte complexe (1) associant modèle hydrologique et modèle de simulation de fonctionnement d'une retenue alimentant un périmètre d'irrigation au pas de temps journalier. Elle permet l'analyse statistique du comportement de tous ses composants : pluie, débits entrant et sortant de la retenue, volumes stockés et évaporés dans celle-ci, volumes utilisés par l'irrigation, surface moyenne cultivée, rendement de production des cultures.

La retenue est définie par sa profondeur maximale H_x et son volume V tel que $V = K.H_x^\alpha$ avec K coefficient d'ouverture et α coefficient de forme.

La simulation de l'irrigation calcule chaque jour les consommations et la croissance des cultures en fonction de l'eau disponible dans le sol. Elle détermine les doses d'irrigation et les surfaces à planter, à récolter ou à abandonner en fonction des besoins en eau des cultures déjà plantées, des réserves en eau dans le réservoir et dans le sol du périmètre ainsi que des prévisions sur les pluies et écoulements à venir selon la saison.

La mise en oeuvre de cette modélisation s'est effectuée sur un cas concret que l'on peut caractériser comme suit :

- a. choix du poste pluviométrique de Pombal (Paraiíba), représentatif des zones peu arides de la région -moyenne de 685 mm sur 69 ans (1911-83)- et du bassin représentatif de Juatama (19 km²) produisant sous la pluviométrie de Pombal 101,5 mm d'écoulement moyen annuel, ce qui est une

(1) Conçu par ORSTOM et SUDENE, Surintendance de développement du Nordeste.

RAPPORT I.11

valeur régionale forte (bassin imperméable et très accidenté).

La variabilité interannuelle de cet écoulement est représenté dans le tableau suivant :

Lame annuelle	
Maximale	427 mm
Décennale humide	280 mm
Médiane	63 mm
Décennale sèche	11,5 mm
Minimale	1,1 mm
Lame de crue décennale	39 mm
Lame de crue annuelle	17,9 mm

- b. simulations appliquées à 4 tailles de bassins : 0,098 km², 1,56 km², 25 et 400 km² sans tenir compte d'un effet d'échelle sur l'écoulement, bien que ceci puisse être fait, une relation régionale entre écoulement et surface de bassin ayant été déterminée.
- c. pour chaque taille de bassin, choix d'un volume maximal Vo, Vo/2 ou Vo/4 sachant que Vo équivaut à l'écoulement moyen annuel sur le bassin. Les coefficients d'ouverture K et α sont déduits d'une analyse régionale (α = 2,7 valeur moyenne).
- d. si So est la surface du périmètre d'irrigation qui consomme le volume annuel écoulé sur le bassin versant, pour une ETP de 2208 mm, les simulations sont effectuées pour So, So/2 et So/4.

Le tableau suivant résume ces caractéristiques.

Surface bassin (km ²)	Volume du réservoir Vo (m ³)	Surface irriguée So (ha)	Coeff. K d'ouvert. réservoir	Profondeur maximale Hx (Vo) (m)
400	40,6.10 ⁶	1839	25 000	15,46
25	2,54.10 ⁶	115	5 200	9,90
1,562	158 600	7,18	1 350	5,84
0,098	9 912	0,45	330	3,53

Le choix de valeurs Vo et So liées aux tailles de bassins permet de comparer les bilans de réservoirs situés dans des bassins de taille différente.

On a supposé que le périmètre d'irrigation était planté de tomates dont la consommation en eau est caractérisée par le tableau suivant :

Phases du cycle végétatif (jours)	0	30	50	75	100	120
Kc	0,40	0,70	1,0	1,0	0,8	0,6
Ky	0,4	0,4	1,1	0,8	0,4	

$$Kc = \frac{ETM}{ETP} \frac{\text{Consommation réelle maximale}}{\text{Evapotranspiration Potentielle}}$$

$$Ky = \frac{\text{Déficit de production}}{\text{Déficit hydrique}}$$

La politique d'irrigation est définie en comparant les besoins des surfaces plantées avec les réserves en eau disponibles et les espérances mathématiques des apports. Au delà d'un certain seuil, le modèle incite à la décision de planter. Inversement, en situation de restriction, il conseille des diminutions de dose ou l'abandon d'une partie du périmètre.

4. Analyse des résultats de simulation

On montre d'abord l'influence de la taille des bassins versants et du volume des retenues en l'absence d'irrigation puis l'on introduit celle-ci.

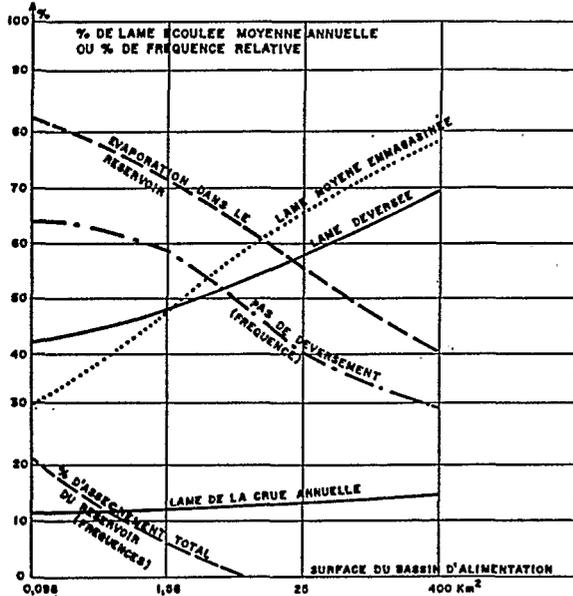
La figure 1 illustre l'influence de la taille du bassin alimentant un réservoir de volume Vo égal au module moyen.

La lame déversée, c'est l'eau disponible pour l'aval. Elle varie de 40 % du module moyen pour un bassin de 10 ha à 70 % pour un bassin de 400 km². L'évaporation sur la retenue passe de 80 % à 40 % de cet apport moyen entre ces 2 tailles de bassin. Les petites retenues s'assèchent plus souvent que les grandes.

L'absence de déversement, donc d'eau disponible pour l'aval varie de 63 % à 30 % des années lorsque l'on passe de 10 ha à 400 km². L'évaporation sur une grande retenue étant moindre que celle sur n petites retenues de même volume total que la grande, la disponibilité en eau pour l'aval est plus affectée par de petites retenues.

La même série de simulation effectuée pour des réservoirs de volume Vo/2 et Vo/4 montre que l'influence de ce volume emmagasinable est d'autant plus grande que l'année est sèche, et évidemment que l'eau disponible en aval est d'autant plus abondante que le réservoir est petit : la lame

Fig. 1

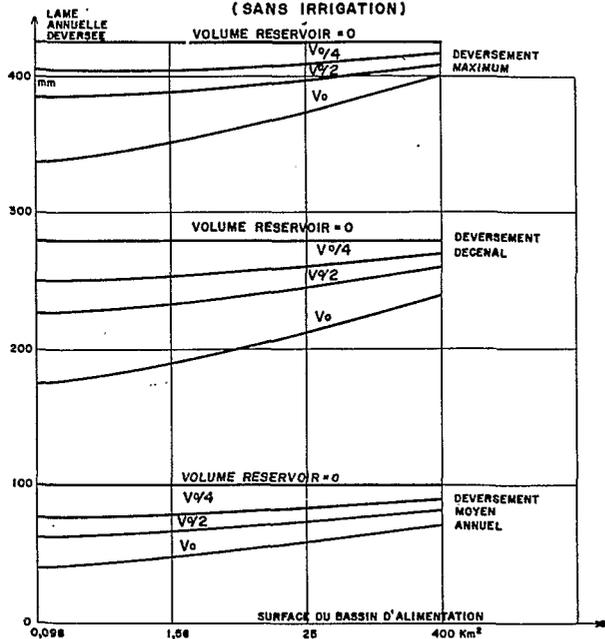


INFLUENCE DE LA TAILLE DU BASSIN VERSANT SUR LE COMPORTEMENT DE RESERVOIR DE VOLUME $V = V_0$ ET SANS IRRIGATION

déversée en aval d'un réservoir de $V_0/4$ varie de 75 % à 90 % du module moyen entre 10 ha et 400 km² (contre 40 à 70 % pour le réservoir V_0). L'absence de déversement s'alterne également : 27 à 15 % des années entre 10 ha et 400 km² pour un réservoir de $V_0/4$ contre 63 et 30 % pour le réservoir V_0 . (Figure 1 bis).

Fig. 1 bis.

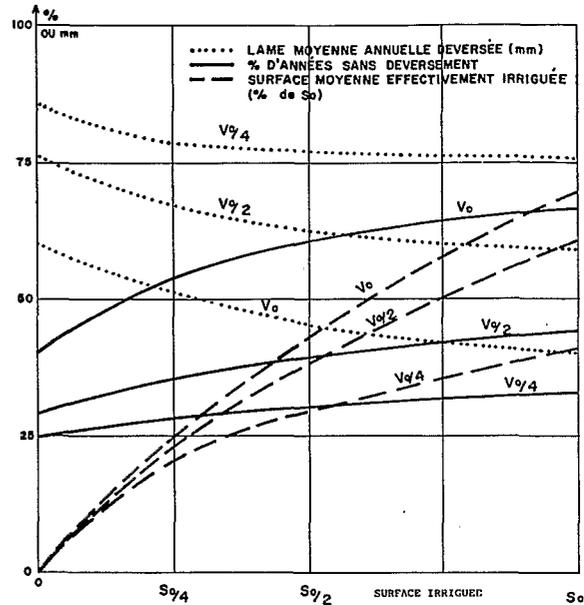
DEVERSEMENTS EN FONCTION DES TAILLES DES RESERVOIRS ET DES BASSINS D'ALIMENTATION (SANS IRRIGATION)



La figure 2 illustre l'influence des tailles du réservoir et du périmètre d'irrigation alimentés par un bassin de 25 km².

Fig. 2

INFLUENCE DES TAILLES DU RESERVOIR ET DU PERIMETRE D'IRRIGATION SUR LE COMPORTEMENT D'UN RESERVOIR ALIMENTE PAR UN BASSIN DE 25 Km²



On y note la quantification de l'effet de l'alimentation d'un périmètre d'irrigation qui évidemment réduit encore plus l'eau disponible en aval et accroît le nombre d'années sans déversement.

Plus la surface irriguée est importante, plus il y a de risque d'être en situation de restriction et même de voir se réduire la surface effectivement irriguée : 6,3 ha irrigués sur un périmètre de $S_0 = 10$ ha avec un réservoir V_0 , et seulement 3,3 ha avec un réservoir $V_0/4$, etc...

Les simulations représentées figure 2 peuvent servir à optimiser le dimensionnement des périmètres irrigués.

L'effet de la taille des réservoirs et celui de la superficie des bassins sont analysés conjointement pour faire ressortir le risque de non-déversement donc d'absence de contribution à la ressource en eau d'aval (Figure 2 bis).

La figure 3 synthétise l'ensemble des simulations en montrant la variation de l'eau disponible en aval d'un aménagement en fonction des tailles du bassin versant, du réservoir et du périmètre irrigué.

On y constate entre autres choses que l'influence de la surface irriguée est d'autant plus sensible que le réservoir a un grand volume et que le

RAPPORT I.11

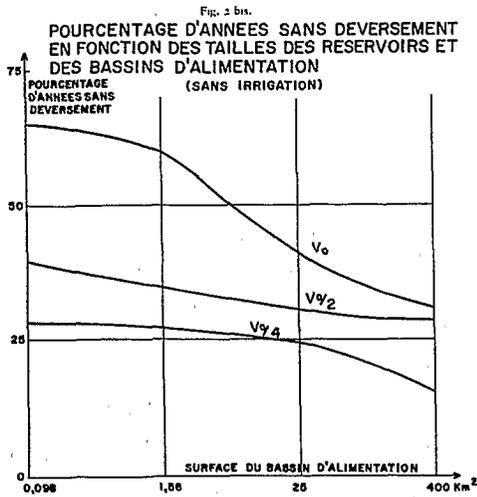
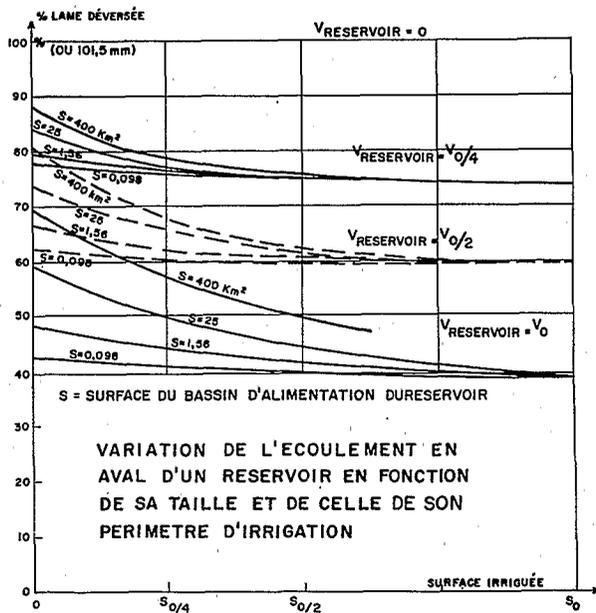


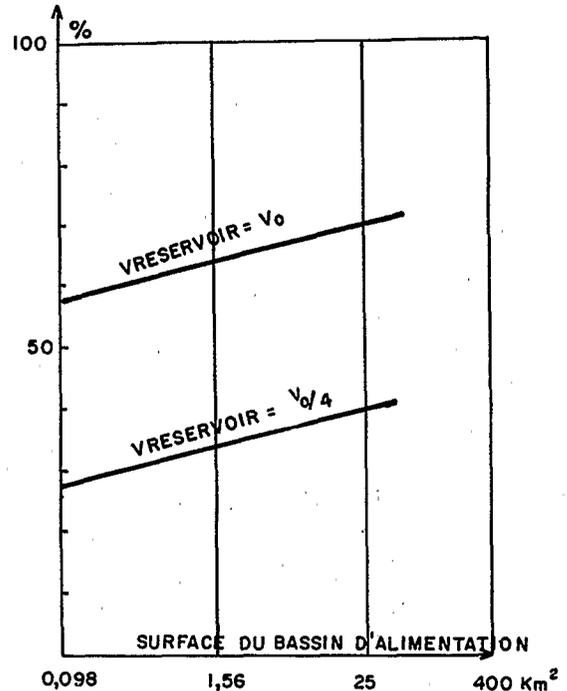
Fig. 3



bassin versant est également de grande taille. On peut en déduire que la valeur moyenne effectivement irriguée croît de 58 à 70 % de la surface du périmètre entre 10 ha et 25 km² de bassin versant pour un réservoir V_0 et seulement de 28 à 40 % pour un réservoir $V_0/4$. Une telle simulation peut servir à optimiser la taille du réservoir. (Figure 4).

Fig. 4.

PROPORTION DU PÉRIMÈTRE INSTALLÉ
REELLEMENT UTILISÉ EN MOYENNE



5. Conclusions

L'influence globale de retenues sur le régime hydrologique de petits cours d'eau de régions tropicales semi-arides a été clairement décrite. Une analyse fine en a été faite grâce à une modélisation hydrologique et de simulation permettant la prise en compte des tailles de bassin versant, des volumes emmagasinés dans les retenues et des surfaces des périmètres d'irrigation.

Le modèle décrit et utilisé sur un exemple concret a des usages multiples et intéressants, tels que le dimensionnement optimal des tailles de réservoirs et des surfaces de périmètres à irriguer pour des projets spécifiques.

La prise en compte de paramètres économiques, tels que le coût de l'hectare irrigué aménagé et la valeur de la production agricole attendue, est envisagée dans une version étendue du modèle, en cours d'élaboration.

On prévoit également l'utilisation de cette modélisation pour comparer en matière de ressources en eau disponibles et de production agricole divers types d'aménagements -petites et grandes retenues- dans un grand bassin.

6. Références bibliographiques

BARBOZA De OLIVEIRA. 1982. Influence de la construction des réservoirs dans le bilan hydrologique. Application au fleuve Acarau. Nordeste du Brésil. Thèse de Doct. Ing. Univ. Paris VI, ENS Mines de Paris, 322 p.

CAMPELLO S. 1979. Modélisation de l'écoulement sur des petits cours d'eau du Nordeste (Brésil). Thèse de Doct. Ing. Univ. Paris VI, 120 p.

DUBREUIL P. 1966. Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans des petits réservoirs d'une région. IAHS. Public. n° 70, vol. 2, pp. 551-558.

DUBREUIL P. GIRARD G. HERBAUD J. 1968. Monographie hydrologique du bassin du Jaguaribe. Mémoires ORSTOM n° 28, 385 p.

DUBREUIL P. GIRARD G. 1971. Influence de très nombreux petits réservoirs sur le module annuel d'une rivière tropicale (exemple pris sur le bassin du Jaguaribe au Brésil). Symp. on man-made lakes. Knoxville, USA.