

Construction de la courbe de remplissage d'un réservoir par bilan hydrologique et applications

Luc SÉCUI (1), Jean ALBERGEL (1), Jean-Claude BADER (1)

RÉSUMÉ

L'équation de continuité appliquée aux données expérimentales de petits réservoirs ou de dépressions naturelles permet la définition de leurs courbes de remplissage. L'estimation est plus précise que celle déduite des fonds topographiques éventuellement disponibles. Deux exemples d'utilisation (reconstitution de crue, modélisation du remplissage d'une dépression) sont présentés.

MOTS CLÉS : Courbe de remplissage — Réservoir — Casamance — Fleuve Sénégal.

ABSTRACT

RESERVOIR STORAGE CURVES DEDUCED FROM WATER BALANCE AND THEIR USE

The equation of continuity applied to field data of small reservoirs or depressions leads to definition of their storage curves. Two examples of use of storage curves on Senegal (flood reconstitution, depression storage modeling) are presented in this paper.

KEY WORDS : Storage curve — Reservoir — Casamance river — Senegal river.

1. INTRODUCTION

Dans un grand nombre d'études hydrologiques, intervient la notion de réservoir. C'est une dépression naturelle (mare pluviale d'hivernage, cuvette du lit majeur, voire un lac fonctionnant comme effluent d'un grand cours d'eau), ou artificielle (retenue collinaire, bas-fond aménagé (BERTON, 1988) (ALBERGEL *et al.*, 1990), açudes brésiliens (MOLLE et CADIER, 1992)). Quelles que soient sa taille et sa nature, un réservoir est d'abord caractérisé par sa courbe de remplissage. Pour un grand barrage, la taille et le volume de la retenue sont tels que la précision métrique des courbes de niveau suffit à définir la courbe hauteur-volume (GIRARD, 1982). Cependant pour de petites dépressions, l'équidistance des courbes altimétriques donnée par les cartes courantes est souvent insuffisante pour rendre compte des micro-reliefs et un nouveau relevé topographique précis est difficile à mettre en oeuvre et souvent très onéreux. L'importance de micro-seuils, pour de petites retenues, est telle qu'il est nécessaire de pouvoir distinguer une courbe de remplissage d'une courbe de vidange. Cette distinction n'est pas possible précisément à partir de l'interprétation d'images aériennes ou satellitaires. La simple connaissance des flux entrant et sortant du réservoir permet de lever cette difficulté.

2. MÉTHODE

Connaissant les volumes entrant et sortant de la dépression ainsi que les variations du niveau du plan d'eau, on peut déterminer la courbe de remplissage en appliquant l'équation de continuité, qui traduit le principe de conservation des volumes.

(1) Orstom, BP 1386, Dakar, Sénégal.

Entre deux instants t_1 et t_2 , l'équation de continuité appliquée à la dépression s'écrit :

$$W_2 - W_1 = [(Q_{e1} + Q_{e2})/2 - (Q_{s1} + Q_{s2})/2]*(t_2 - t_1) + [P - E]*(t_2 - t_1)*A \quad (1)$$

avec	$W_2 - W_1$: variation du stock d'eau entre t_1 et t_2	[L ³]
	Q_{e1} et Q_{e2}	: débits entrants aux instants t_1 et t_2	[L ³ .T ⁻¹]
	Q_{s1} et Q_{s2}	: débits sortants aux instants t_1 et t_2	[L ³ .T ⁻¹]
	P	: précipitation entre t_1 et t_2	[L]
	E	: pertes (évaporation, infiltration) par unité de surface et de temps	[L.T ⁻¹]
	A	: surface inondée.	[L ²]

soit $h_2 - h_1$: variation de la hauteur au centre de la cuvette entre t_1 et t_2 ,

Si l'on suppose que pour de très petites variations de hauteurs, la surface reste constante,

$$W_2 - W_1 = A*(h_2 - h_1) \quad (2)$$

Par égalité de (1) et (2),

$$A = \{ [(Q_{e1} + Q_{e2})/2 - (Q_{s1} + Q_{s2})/2]*(t_2 - t_1) \} / \{ (h_2 - h_1) + E*(t_2 - t_1) - P \} \quad (3)$$

Pour l'application de la méthode, les données à acquérir sont donc

- les divers flux d'eau à travers la dépression :
- les précipitations sur le plan d'eau,
- les débits entrants et sortants mesurés,
- les pertes globales par évapotranspiration et infiltration estimées par la baisse du plan d'eau en période de fermeture de la retenue.
- les variations altimétriques du plan d'eau.

Pour déterminer précisément les débits entrants et sortants du réservoir, nous recommandons d'effectuer des jaugeages plutôt que d'appliquer une formule d'hydraulique dont les conditions d'utilisation sont difficiles à cerner et à respecter. Enfin, la méthode ne s'applique qu'à de petits réservoirs pour lesquels le niveau du plan d'eau peut être assimilé à un plan horizontal facilement contrôlable par un seul limnimètre.

3. APPLICATION À DEUX DÉPRESSIONS DU SÉNÉGAL

L'équation ainsi formulée a été utilisée dans deux dépressions de morphologie et de fonctionnement distincts : le bassin de Djiguinoum en Casamance et une fraction de la cuvette de Nianga dans le lit majeur du Sénégal.

3.1. LE BASSIN DE DJIGUINOUM

Situé sur la rive droite de la Casamance à 15 km au nord-est de Ziguinchor, le bassin a une superficie de 26,5 km². La vallée recouvre 271 ha dont 150 ha pour le bas-fond inondable. Avant la construction d'un barrage anti-sel, la mer envahissait quotidiennement ce bas-fond. La gestion du barrage consiste à évacuer le maximum de sel du bas-fond rizicole par l'ouverture journalière de la vanne à marée basse.

Durant l'hivernage 1989, 193 jaugeages ont été effectués au niveau du barrage lors des lâchers d'eau. Le marigot alimentant en eau douce le bas-fond a également été contrôlé. Parallèlement, les hauteurs du plan d'eau étaient enregistrées à l'amont du barrage. Un réseau de pluviographes a servi à déterminer le flux précipité sur la retenue. L'équation de continuité a été utilisée avec un pas de 5 minutes. Sur cet intervalle de temps, les pertes par évapotranspiration ou infiltration sont négligeables. Le volume de chaque lâcher d'eau a été rapporté à la baisse du plan d'eau qu'il a engendré. La figure 1 présente la courbe hauteur-surface obtenue dont on déduit la courbe hauteur-volume par intégration (cf. figure 2). La hauteur est la moyenne $(h_1 + h_2)/2$ durant le pas de temps fixé (5 minutes).

La courbe de remplissage calculée à partir d'un levé topographique fin de la vallée (ALBERGEL et al., 1990) donne pour les mêmes hauteurs des volumes supérieurs. Au dessus d'une hauteur dans la retenue de 60 cm, la différence entre les deux courbes est de l'ordre de 40%. En effet, une fraction de l'eau est retenue par les diguettes (d'une hauteur de 0,50 m environ) des casiers rizicoles traditionnels et n'est pas reprise lors des lâchers. La diffé-

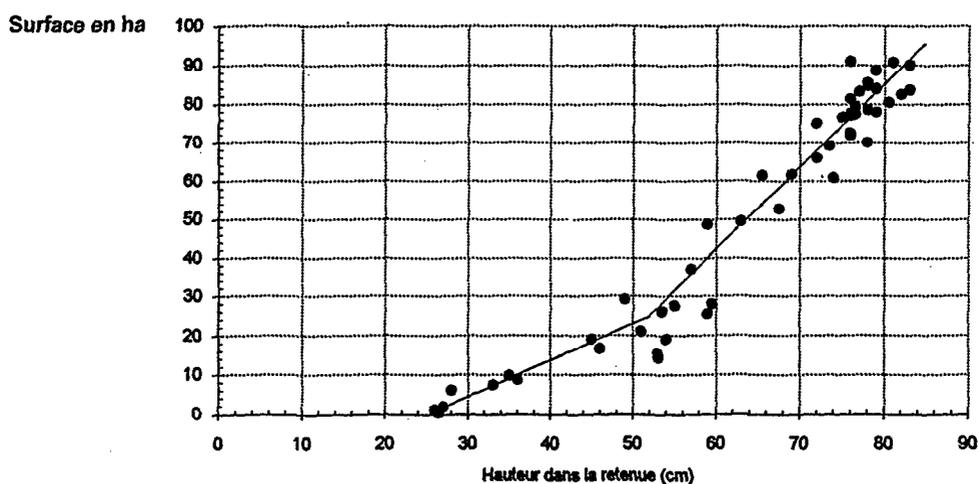


FIG. 1. — Courbe hauteur-surface de la vallée de Djiginoum.

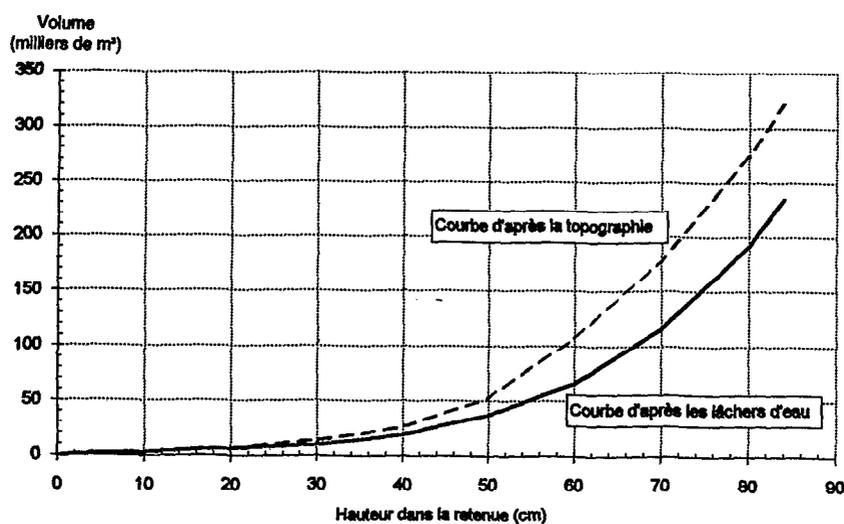


FIG. 2. — Courbes hauteur-volume de la vallée de Djiginoum.

rence ne peut être imputée à une imprécision sur les jaugeages dont l'erreur relative est considérée égale à 5 %. L'imprécision sur la courbe obtenue par bilan hydrologique peut provenir d'une sous-estimation du flux entrant par ruissellement direct autour du plan d'eau. En fonction des usages (calcul des variations altimétriques du plan d'eau par apport ou vidange), on utilisera l'une ou l'autre courbe.

3.2. LA CUVETTE DE NIANGA

Située au sud de Podor sur la rive gauche du lit majeur du Doué (bras du Sénégal), la cuvette mesure environ 200 km². Endiguée, elle est partiellement aménagée en casiers rizicoles (1 000 ha) alimentés par pompage dans le Doué. Dans la zone naturelle lors des crues du Sénégal, l'eau pénètre par les ponts barrages de N'Diayène et N'Diawara (cf. figure 3).

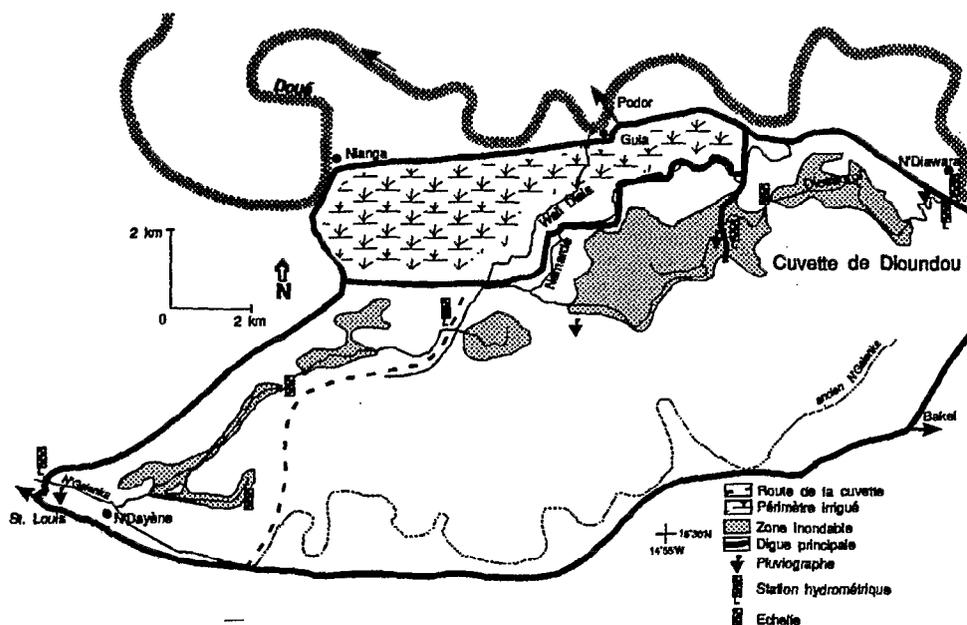


FIG. 3. — Plan de la cuvette de Nianga.

Les surfaces inondées qui sont cultivées en sorgho de décrue varient en fonction de la disponibilité de l'eau durant la crue du Doué.

En 1991 et 1992, la dépression de Dioundou à l'est de la cuvette a fait l'objet d'un suivi hydrologique. Elle est limitée à l'aval par une petite digue munie d'une vanne à crémaillère obturant une buse en béton. Cette digue a pour fonction de réhausser le niveau d'eau à l'amont. Sa vanne est ouverte à la décrue afin d'inonder les terrains plus en aval. Le limnigramme obtenu en 1991 (cf. figure 4) au centre de la dépression montre deux phases de remplissage séparées par une période de vidange par évapotranspiration et infiltration. En 1992, la crue monomodale entraîna un seul remplissage. La vidange se fait par ouverture de la vanne aval.

Les volumes entrant dans la dépression sont mesurés à l'aval du pont-barrage de N'Diawara. 61 jaugeages ont été effectués en 1991, 66 en 1992. Les deux pluviographes aux deux extrémités de la cuvette ont permis l'estimation des précipitations (133 mm en 1991 et 142 mm en 1992). Les volumes sortant de la dépression à travers la buse en charge sont calculés par une formule d'hydraulique vérifiée par jaugeages.

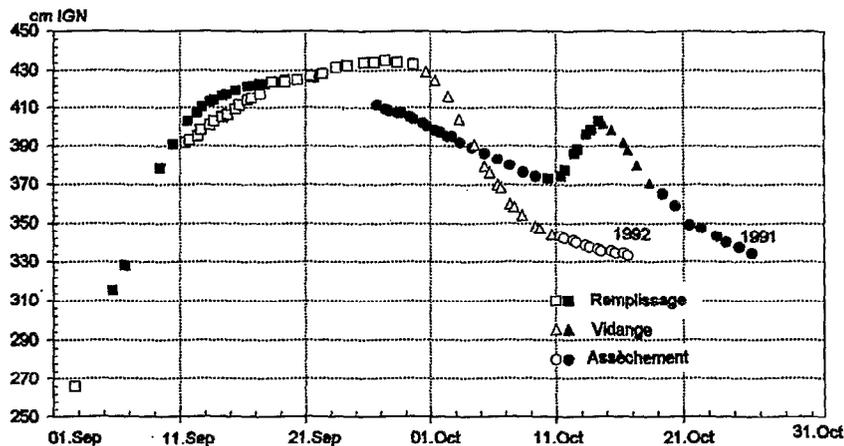


FIG. 4. — Limnimétrie (cm IGN) au centre de la cuvette de Dioundou.

L'équation de continuité est appliquée entre deux jaugeages consécutifs. L'intervalle de temps atteignant parfois 12 heures ne permet plus de négliger les pertes. Celles-ci (évapotranspiration, infiltration confondues) ont été estimées à 3 cm par jour d'après la phase de tarissement observée en 1991.

Sur cette dépression sensiblement plus grande que le bassin de Djiguinoum, la dispersion des couples hauteur-surface inondée est plus importante (cf. figure 5). Les surfaces inondées déterminées lors du premier remplissage en 1991 (30/8-22/9/91) paraissent surestimées. Par contre, les nuages de points des deux autres phases de remplissage se correspondent. Du fait de la présence de seuils, les volumes disponibles à la vidange sont inférieurs aux volumes stockés lors du remplissage.

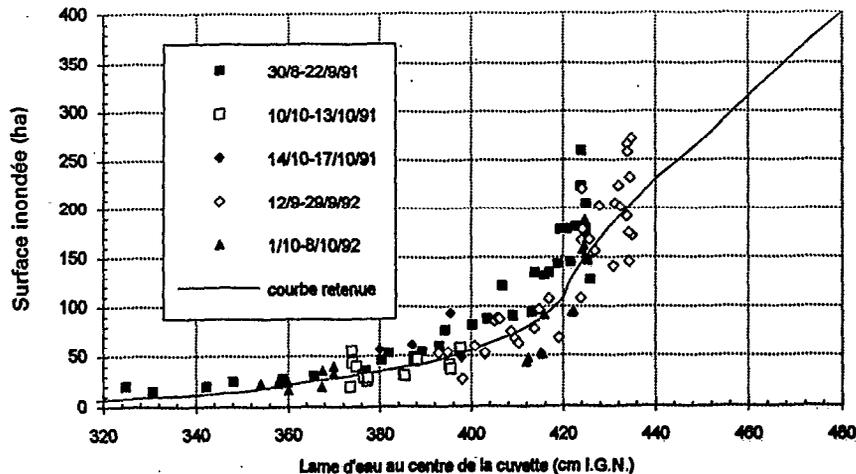


FIG. 5. — Courbe hauteur-surface de la cuvette de Dioundou.

Bien qu'il semble envisageable de distinguer une courbe de remplissage et une de vidange, nous avons préféré retenir qu'une courbe étant donné la dispersion. Cette courbe a été extrapolée jusqu'au point de coordonnées (4,80 m ; 400 ha) déterminé par planimétrie de la carte au 1/50 000.

La méthode a pu être validée par l'analyse d'une image SPOT prise le 3 octobre 1991. L'étude de la luminosité dans le canal 3 (proche infra-rouge, 790-890 10-9 m) montre que les surfaces en eau correspondent aux pixels de compte numérique inférieur à 96. Dans la zone de la cuvette de Dioundou, 1380 pixels (20 m de côté) répondent à ce critère. Ce qui représente une surface en eau de 55 ha (SÉCUS, 1992). D'après la courbe hauteur-surface retenue de la figure 5, le plan d'eau à une altitude de 4,03 m I.G.N. le 3 octobre, envoyait une surface de 61 ha. Il aurait été intéressant de valider la partie supérieure de la courbe par une autre image mais au coût de la vue s'ajoutent les contraintes techniques de programmation du satellite. La période de scrutation est au minimum d'une semaine et doit être fixée au moins 21 jours à l'avance.

4. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES COURBES OBTENUES

4.1. RECONSTITUTION DE CRUES À DJIGUINOUM

Lors des pluies, le ruissellement est généralisé autour du plan d'eau. L'étude des crues passe par la reconstitution d'un hydrogramme au barrage. Le limnigramme ($H = f(T)$) du plan d'eau est transformé en chronique des volumes disponibles au barrage ($V = f(T)$) au moyen de la courbe hauteur-volume de vidange (cf. figure 2). Après discrétisation au pas de 10 minutes, les volumes disponibles sont convertis en débit (dV/dT) auquel, éventuellement est ajouté le débit lâché.

La crue reconstituée du 24 juillet 1989 et son hyétogramme associé sont représentés sur la figure 6. La reconstitution de toutes les crues permet le bilan hydrologique au barrage (tabl. I).

TABLEAU I : Bilan hydrologique annuel de la vallée de Djiguinoum

Année	Pluie moyenne sur le bassin (mm)	Volume remobilisable au barrage (million de m ³)	Volume lâché au barrage (million de m ³)
1989	1 148	1,254	1,026
1990	1 008	0,990	0,792

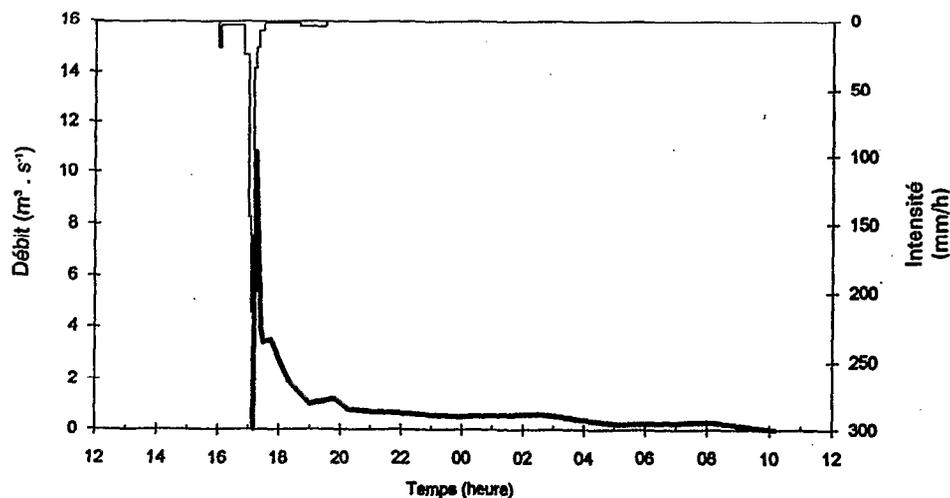


FIG. 6. — Crue reconstituée du 24 juillet 1989 et hyétogramme associé.

4.2. STATISTIQUE DES SURFACES MAXIMALES INONDÉES ANNUELLEMENT À NIANCA

Connaissant les hauteurs du Doué au droit de l'effluence, les précipitations sur la cuvette, la courbe d'étalonnage de l'effluence (pont barrage de N'Diawara) et la courbe hauteur-surface, l'équation (3) permet la modélisation du remplissage. Le régime du Sénégal, donc du Doué, est maintenant dépendant de la gestion des deux barrages de Manantali et de Diama. Le premier, situé dans la haute vallée sur le Bafing, régularise 50 % des apports annuels. Le second construit à l'embouchure prévient les invasions marines et permet le maintien d'un plan d'eau douce dans la basse vallée. Le barrage amont est à buts multiples. Différents scénarios de gestion ont été établis par GIBB et al. (1986). Au moyen des logiciels SIMULSEN (BADER, 1991) et COREDIAM (BADER, 1992), nous avons reconstitué une chronique journalière de hauteurs au droit de l'effluence, sur la période 1950-1989 pour des scénarios de gestion moyens. Les règles de gestion retenues dans ce calcul pour le barrage réservoir de Manantali, sont par ordre de priorité décroissante:

- le laminage des crues du Bafing à $1500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ à la sortie du barrage et du Sénégal à $4500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ au niveau de Bakel,
- la satisfaction des besoins en eau pour la culture irriguée de 100 000 hectares dans la vallée,
- la satisfaction d'une demande de production électrique pour une puissance constante demandée de 80 mégawatts,
- le soutien d'une crue artificielle d'un débit maximum de $2500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pendant 6 jours à Bakel, à l'entrée de la moyenne vallée.

Au barrage de Diama, la cote est supposée maintenue constante à 1,50 m I.G.N..

Pour simuler le remplissage de la cuvette de Dioundou, les courbes d'étalonnage de l'effluence et hauteur-surface de la cuvette ont été extrapolées. Pour cette dernière courbe, la limite supérieure est fixée à 4,80 m I.G.N. (soit 400 ha), altitude au dessus de laquelle, la digue fermant la cuvette à l'aval serait submergée. Le pertuis de N'Diawara est considéré fermé si le niveau du Doué devient inférieur à celui du plan d'eau dans la cuvette. De la chro-

nique simulée des superficies journalières inondées, les superficies maximales annuelles inondées ont été extraites. La figure 7 présente les fréquences empiriques au non dépassement des surfaces maximales inondées. Avec les règles de gestion retenues pour les deux barrages de Manantali et Diama, on constate qu'une année sur deux, la cuvette est totalement inondée (400 ha).

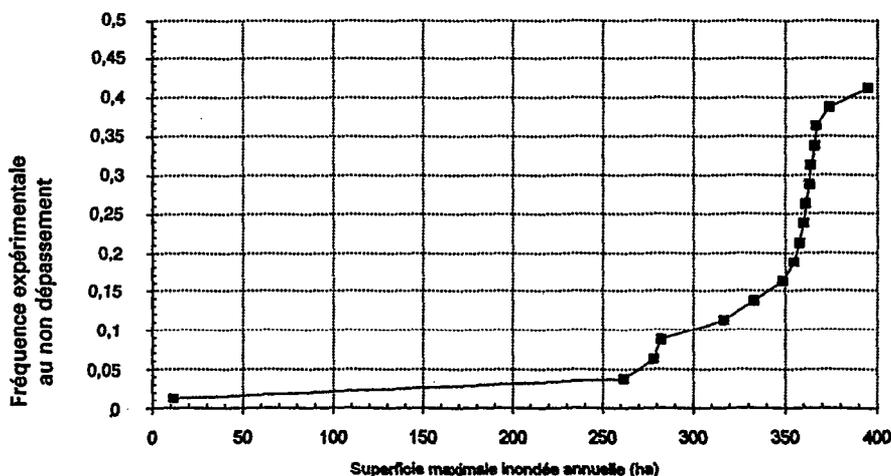


FIG. 7. — Statistique des superficies maximales inondées simulées sur la période 1950-1989.

5. CONCLUSION

La connaissance précise de la capacité d'un réservoir en fonction de la cote du plan d'eau est un élément essentiel de son contrôle et de sa gestion. Une à deux campagnes de jaugeages permettent de déterminer les caractéristiques hydrologiques d'une petite retenue avec une précision supérieure aux cartes existantes. Ces courbes rendent possible la modélisation hydrologique de réservoirs dans des milieux à faible relief et à écoulement diffus. L'écart observé entre les courbes calculées en phase de remplissage ou bien en phase de vidange rend compte des volumes d'eau piégés par des seuils indécélérables sur les cartes topographiques courantes. Cependant, les seules caractéristiques volumétriques du réservoir sont insuffisantes pour permettre une gestion hydro-agricole de tels milieux. Il est nécessaire de connaître la répartition spatiale des surfaces inondées puis exondées. Un moyen de définir quelques unes des courbes isohypses consistera à délimiter les rives du plan d'eau sur des images aériennes ou satellitaires prises à différents stades de remplissage de la retenue.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), BRUNET (D.), DUBÉE (G.), MARIEU (B.), MONTOROI (J.-P.), ZANTE (P.), 1990. — Rapport hydrologique 1989, Vallée de Djigoumou, Casamance. Programme C.E.E. D.C. XII, contrat n° TS2A-0216-M, Orstom, Dakar, 73 p.
- BADER (J.-C.), 1991. — SIMULSEN : Logiciel de simulation de gestion de la retenue de Manantali au pas de temps journalier. Notice d'utilisation. Orstom, O.M.V.S., Dakar, 19 p. plus annexes.
- BADER (J.-C.), 1992. — Calcul de la courbe de remous du barrage de Diama. Logiciel COREDIAM. Orstom, O.M.V.S., Dakar, 14 p. plus annexes.
- BERTON (S.), 1988. — La maîtrise des crues dans les bas-fonds. Petits et microbarrages en Afrique de l'ouest. Dossier n° 12, GRET Paris, 474 p.
- GIBB and partners, Électricité de France international, Euroconsult, 1986. — Etude de la gestion des ouvrages communs de l'O.M.V.S., scénarios d'utilisation de l'eau. Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, 110 p. plus annexes.
- GIRARD (G.), 1982. — Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs. Modèle MODLAC. Cah. Orstom, sér. Hydrol., vol. XIX, n° 2 : 55-72.
- MOLLE (F.), CADIER (E.), 1992. — Manual do pequeno açude. SUDENE-ORSTOM, Recife Brésil, 523 p.
- SÉGUIE (L.), 1992. — Rapport hydrologique de la cuvette de Nianga. Orstom, Dakar, 42 p. plus annexes.