Prédétermination de la durée de vie de barrages en Algérie

Predermination of the reservoirs life in Algeria

par M. Kassoul

Laboratoire de Mécanique
Université de Caen

Yearly the deposition of sediments amputates from 2% to 5% of the global water reserve of the hydraulic infrastructure in the Maghreb countries. The aim of the present study is to contribute to the deposit quantification in order to define proper hydrotechnical structures, and to increase their life time (reducing costs).

Firstly, the author undertakes the information stemming from topo-bathymetric processing of 19 dams in Algeria. He therefore analyses these data with the aim of setting up a simple model for estimating deposits and classifying the Algerian dams.

I ■ INTRODUCTION

Le calcul de la sédimentation qui va s'accumuler dans une retenue est considéré comme étant un outil de prévision lors de la planification, la conception et l'exploitation d'un ouvrage hydraulique. La genèse, les transports et les dépôts des sédiments sont des processus dynamiques complexes : ils englobent l'érosion des sols, le dépôt aux pieds des versants, la substitution des charges, le sapement et l'effondrement des berges, le transport dans le réseau hydrographique par le charriage de fond, la transformation et l'eutrophisation des cuvettes, l'ensablement des estuaires et la formation des deltas. La figure 1 montre la genèse et le cheminement des sédiments dans les cours d'eau et bassins versants.

Ces processus restent difficiles à quantifier individuellement. Par contre, la mesure des sédiments au niveau des barrages est un résultat intégrant tous ces processus [1].

L'objectif est, après exploitation des résultats de quantification des alluvions des ouvrages envasés, de déterminer l'année limite de mise en service de nouveaux ouvrages hydrotechniques.

II ■ CARACTÉRISTIQUES HYDROMORPHO-MÉTRIQUES DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS

Les différents barrages étudiés sont situés dans des bassins versants répartis sur une zone qui couvre une partie importante du territoire algérien, de par son relief varié (montagne, plaine), la diversité de sa végétation (forêt, broussailles, prairies,...) et de son climat (sub-humide, semi-aride, aride).

La majeure partie des bassins versants a une pluviométrie moyenne interannuelle comprise entre 300 et 600 mm, le climat semi-aride y est fortement représenté. Cinq barrages

1. Genèse et cheminement des sédiments dans les cours d'eau et bassins versants, d'après Karaouchov [1].

Barrages	Oued	Ip	Dd	Dh	Ce	C(Mm ³)	A(Mm ³)	C/A
BOUGHZOUL	Chlef	-	-	1,09	0,014	55	82,8	0,66
GHRIB	Chlef	0,14	-	1,49	0,020	280	148	1,89
O. FODDA	Fodda	0,14	4,7	1,75	0,200	228	82,76	2,75
BAKHADDA	Mina	3,5	0,60	0,130	56	70	0,80	
S.M.B.A.	Mina	-	-	1,82	0,060	235	120	1,96
HAMIZ	Arbatash	0,24	4,1	1,70	0,480	21	52	0,40
EGHILMDA	Agrioum	0,20	4,5	1,51	0,280	154	175	0,88
ZARDEZAS	Safsaf	0,18	3,5	1,53	0,240	31	53	0,58
CHEFFIA	Bounamo	0,17	3,1	1,96	0,300	171	140	1,22
KSOB	Ksob	0,13	4	1,10	0,100	31	51,5	0,60
F. ELGHERZA	Elabiod	-	5,5	1,38	0,040	47	21	2,24
F.ELGHEISS	Gheiss	0,26	2,8	0,86	0,160	3	11,3	0,26
SARNO	Sarno	0,11	1	1,00	0,070	22	12	2,59
CHEURFA	Makerra	-	2,6	1,65	0,018	14	28	0,50
BOUHNIFIA	Elhamam	-	-	1,28	0,040	73	138,8	0,52
FERGOUG	Elhamam	-	-	1,78	0,040	18	151	0,12
DJ. ETTORBA	Guir	-	-	-	0,060	360	200	1,80
BENI BAHDEL	Tafna	0,09	2,4	0,92	0,160	63	73,9	0,85
MAFFROUCH	Mafrouch	0,16	2	0,34	0,270	15	16	0,94
- : absence de données.								

Tableau 1: Caractéristiques hydromorphométriques des systèmes étudiés [1].

sont situés dans des régions sub-humides (dont la pluviométrie est un peu supérieure à 600 mm) et un seul en climat désertique avec une pluviométrie moyenne interannuelle de 150 mm [1].

Le tableau 1 montre l'ensemble des paramètres géométriques et hydromorphométriques.

III ■ EVALUATION DES VOLUMES DES SÉDIMENTS

Les données de base ont été élaborées par la Compagnie Géophysique de France et traitées par Géokart dans le cadre d'un contrat avec l'Agence Nationale des Barrages. Les mesures bathymétriques ont été réalisées avec embarcation, à l'aide d'un échosondeur qui enregistre en continu la profondeur. Cet échosondeur était synchronisé avec un stadimètre micro-onde. Les travaux portant sur ces relevés se basent sur les points connus d'après la triangulation et la polygonation géodésique.

La comparaison des plans topo-bathymétriques effectués à deux dates différentes donne le volume d'alluvionnement durant la période comprise entre celles-ci.

Les travaux de dépouillement avaient pour but la réalisation de :

— un plan topo-bathymétrique du réservoir effectué à partir des résultats des relevés sur terrain ;

— un graphique de la relation surface en fonction des niveaux d'eau [$S=f(H)$] ;

— la surface du réservoir à la cote R_N et à la cote R_{max} du graphique de la relation capacité en fonction du niveau d'eau [$y=f(H)$] ;

— la capacité du réservoir à la cote R_N et à la cote R_{max} en 1986.

La quantification des volumes de sédiments, pris à partir de différentes sources, est donnée dans le tableau 2 ; les résultats obtenus prennent en compte, le cas échéant, le dévasement et la surélévation.

Cet échantillon de 19 barrages pêche par le manque d'uniformité des périodes d'observations, et une distribution spatiale différente d'où l'irrégularité des relevés topo-bathymétriques. L'envasement moyen obtenu montre des valeurs un peu disparates qui varient dans une fourchette de 0,017 Mm³/an (cas de Mefrouch dont le bassin versant possède la plus faible taille) et 2,490 Mm³/an (Ghrib dont le bassin versant présente la plus importante superficie). Cela a entraîné une perte dans la capacité initiale qui arrive à la limite de la durée de vie pour certains, tel que le barrage Fergoug dont le bassin versant montre une légère végétation. Le barrage Cheffia présente la plus faible perte en capacité ; cela pourrait être dû à l'influence des caractéristiques de son bassin versant côtier couvert d'une végétation assez dense et est accaparé par des forêts de chênes, qui jouent un rôle capital dans la lutte contre l'érosion.

Barrages	Superficie du B.V. (km ²)	Capacité initiale (Mm ³)	Période de calcul	Envas. moyen (Mm ³ /an)	Capacité en 1986 (Mm ³)	Perte en capacité (%)
BOUGHZOUL	19740	55	1934/1986	0,570	20,38	62,94
GHRIB	23300	280	1939/1986	2,490	138,57	50,51
O. FODDA	790	228	1932/1986	2,246	132,30	41,97
BAKHADDA	1275	56	1963/1986	0,082	45,44	18,85
S.M.B.A.	6100	235	1978/1985	1,170	227,40	3,23
HAMIZ	137	21	1935/1986	0,155	8,49	59,57
EGHILMDA	650	154	1954/1974	1,832	120	22,07
ZARDEZAS	346	31	1977/1986	0,450	14,78	52,32
CHEFFIA	575	171	1965/1986	0,124	168,40	1,52
KSOB	1470	31	1977/1986	0,395	12,43	59,90
F. ELGHERZA	1300	47	1950/1986	0,590	25,76	45,19
F. ELGHEISS	153	3	1939/1986	0,030	1,60	46,66
SARNO	264	22	1954/1986	0,414	21,57	1,95
CHEURFA	4015	14	1882/1967	0,061	9	35,71
BOUHNIFIA	7850	73	1944/1967	0,913	52	28,76
FERGOU	8274	18	1970/1986	0,881	3,90	78,33
DJ. ETTORBA	22000	360	1967/1986	2,290	316,40	12,11
BENI BAHDEL	990	63	1944/1986	0,107	56,40	10,47
MAFFROUCHE	85	15	1940/1986	0,017	14,60	2,66

Tableau 2 : Quantification de l'alluvionnement des barrages étudiés, [1].

IV ■ CALAGE DU MODÈLE

L'information de base recueillie pour le calage du modèle est présentée dans le tableau 1. Le travail consiste à exploiter les résultats des mesures d'expertises effectués et de déterminer les facteurs hydroclimatiques ou physico-géographiques les plus influents sur le taux d'abrasion.

Les facteurs dont dépend l'érosion sont largement connus. Nous avons sélectionné ceux qui sont quantifiables, disponibles ou faciles à déterminer :

- Caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants,
- Pluviométrie,
- Apport moyen interannuel,
- Coefficient d'écoulement,
- Rapport capacité du barrage-apport moyen interannuel.

La lithologie et le couvert végétal ont une influence importante sur l'érosion. En fait, ces facteurs que l'on peut étudier ponctuellement (sur parcelles) ne sont pas modélisables à l'échelle d'un bassin versant (hétérogénéité, effet de changement d'échelle). Ils sont globalement intégrés dans les mesures d'envasement et provoquent les dispersions autour des courbes des équations établies plus loin.

Le paramètre exprimant la sédimentation a été normalisé en taux d'abrasion (Ta) c'est-à-dire le volume de sédiments mesuré au niveau de la cuvette du barrage pendant une durée donnée et ramené à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne (tableau 3).

Le barrage Ighilemda possède un taux d'abrasion maximal dont le bassin versant côtier cumule de fortes précipitations (coefficient d'écoulement considérable), par contre le barrage de Cheurfa présente une valeur importante déterminée par son faible taux d'abrasion. L'impluvium continental de ce dernier est faiblement arrosé (faible coefficient d'écoulement).

La recherche des liens préférentiels entre la sédimentation et les facteurs retenus est effectuée d'abord graphiquement, où le taux d'abrasion (Ta) a été porté sur l'axe des ordonnées et le logarithme de la superficie (S) sur l'axe des abscisses, les valeurs de la deuxième ou de la troisième variable explicative (C , A ,...) ont permis la partition de la population étudiée.

Nous avons donc étudié les courbes suivantes :

- Ta en fonction de la surface (S) et la pluviométrie (P),
- Ta en fonction de la surface (S) et l'apport liquide (A),
- Ta en fonction de la surface (S) et successivement tous les paramètres hydromorphométriques,
- Ta en fonction de la surface (S) et le rapport capacité-apport liquide (C/A),
- Ta en fonction de la surface (S) et l'indice d'altitude (Dh).

Aucune corrélation n'a été remarquée entre le taux d'abrasion (Ta), la superficie (S) et les divers paramètres testés exceptés le coefficient d'écoulement (C_e , fonction de la lame liquide inter annuelle écoulée) et le coefficient d'altitude ($Dh = (H_{95\%} - H_{5\%}) / H_{moy}$), qui ont donné une différen-

Barrages	Superficie du B.V. (km ²)	Pluviométrie interannuelle (mm)	Envas. moyen (Mm ³ /an)	Taux d'abrasion (m ³ /km ² /an)
BOUGHZOUL	19740	300	0,570	28,85
GHRIB	23300	331	2,490	129
O. FODDA	790	535,5	2,246	2233
BAKHADDA	1275	430	0,082	76,23
S.M.B.A.	6100	330,8	1,170	160,41
HAMIZ	137	790	0,155	2289
EGHILMDA	650	946	1,832	2558
ZARDEZAS	346	642	0,450	1825
CHEFFIA	575	798,5	0,124	217
KSOB	1470	370,7	0,395	268
F. ELGHERZA	1300	388,2	0,590	454
F. ELGHEISS	153	456,6	0,030	191
SARNO	264	459	0,414	54
CHEURFA	4015	389	0,061	16
BOUHNIFIA	7850	460	0,913	118
FERGOUG	8274	460	0,881	104
DJ. ETTORBA	22000	150	2,290	105
BENI BAHDEL	990	450	0,107	56
MAFFROUCHE	85	688,2	0,017	205

Tableau 3 : Taux d'abrasion dans les barrages étudiés.

tiation nette de dix-neuf barrages répartis en trois groupes bien distincts (figure 2).

La liaison entre la partition typologique obtenue et le contexte géographique des barrages a permis de constater une répartition des barrages en trois classes Ia, Ib et II et ceci en fonction de trois facteurs essentiels : la superficie du bassin versant (*S*), le coefficient d'écoulement (*C*) et l'indice d'altitude (*Dh*).

L'analyse en composantes principales, appliquée sur l'ensemble des données des barrages étudiés : 18 individus (barrages) et 5 variables (superficie, taux d'abrasion, rapport entre la capacité du barrage et l'apport moyen interannuel, coefficient d'écoulement, coefficient d'altitude) et présentés dans la figure 2, a permis de confirmer la répartition manuelle, [3].

La répartition des variables montre que l'axe I oppose le pôle " coefficient d'écoulement, taux d'abrasion ", qui sont

positivement corrélés, au pôle " surface ". Cet axe représente les processus physiques (apports) issus des écoulements en fonction de la superficie, donc il peut être baptisé " effet d'écoulement ". L'axe II est caractérisé par le coefficient d'altitude et un peu par le rapport *C/A*, et peut représenter le relief des systèmes étudiés.

La distribution des individus (barrages) montre, globalement, trois groupes distincts : le premier groupe, (Oued Fodda, Hamiz, Ighilemda, Zardezas, Cheffia) caractérisé par de fortes valeurs des coefficients d'écoulements et taux d'abrasion, est opposé selon l'axe I (41,9 % de variance) au second groupe (Boughzoul, Ghrib, S.M.B.A., Fom Elgherza, Sarno, Cheurfa, Bouhanifia, Fergoug) qui possède les plus grandes tailles de bassin. Et un troisième groupe hétérogène (Bakhadda, Fom Elgheis, Beni Bahdal, Mefrouche) dont les caractéristiques ne présentent aucune tendance générale avec des coefficients d'altitudes moyens.

Les groupes Ia, Ib et II obtenus dans le calage graphique apparaissent bien dans les résultats issus de l'A.C.P., et ils sont typiquement bien représentés, [3]. Ces résultats corroborent les constatations formulées précédemment. Et les relations entre les classes de barrages et les facteurs déterminants sont pertinentes.

Après l'analyse manuelle et en composantes principales, on a pu mettre en évidence un regroupement de barrages en trois catégories dépendant essentiellement de la superficie, de l'indice d'altitude et du coefficient d'écoulement, ce qui a permis d'établir le tableau 4.

2. Analyse en composantes principales des données des barrages étudiés. Plan factoriel I-II

Tableau 4 : Classification des barrages étudiés.

Classes	Superficie du B.V. km ²	Coefficient d'écoul.	Indice d'altitude m ³ /km ² /an	Taux d'abrasion
Ia	< 1000	0,1 à 0,3	< 1	< 500
Ib	> 1000	< 0,15	1 à 2	< 500
II	< 1000	0,2 à 0,5	1,5 à 2	> 1700

Classe Ia : Bakhadda, Fom Elgeiss, Beni Bahdel, Maffrouche.

Classe Ib : Boughzoul, Ghrib, S.M.B.A., Ksob, Fom Elgherza, Sarno, Cheurfa, Bouhnifia, Fergoug.

Classe II : Oued Fodda, Hamiz, Cheffia, Eghilmda, Zardezas.

Pour plus de précision, nous avons procédé à des calages provisoires de fonctions basés sur la méthode des moindres carrés [4], les équations testées sont de type linéaire, puissance et exponentiel :

$$f(x) = ax + b; \quad f(x) = ax^n + b; \quad f(x) = a \cdot x^{-n} + b; \quad f(x) = ae^{cx};$$

$$f(x) = ae^{-x} + c$$

où x est la superficie en km².

L'ajustement des séries "taux d'abrasion, superficie" sur les résultats d'observation des trois catégories de barrages prédéfinies, en tenant compte de la minimisation de l'erreur par la méthode des moindres carrés, donne les résultats suivants (tableau 5) :

Tableau 5 : Equations du calage par la méthode des moindres carrés.

Classe de barrages	Superficie km ²	Equation	Coef. de corrélation	Erreur
Ia	$S < 1000$	$Ta = 1433S^{-0,43} - 15,24$		$\pm 64,20$
Ib	$S > 1000$	$Ta = 1846S^{-0,15} - 360$	0,853	$\pm 172,48$
II	$S < 1000$	$Ta = 0,463S + 2026$		$\pm 363,34$

Les meilleurs ajustements donnent des coefficients de corrélation faibles, et des erreurs optimisées assez importantes surtout pour la classe II. Ces résultats indiquent que la superficie seule n'est pas un facteur déterminant, et l'aberration est de ne pas intégrer davantage de paramètres régissant les mécanismes sédimentaires dans la zone d'étude. Donc, le recours aux résultats de l'abaque de classification (graphique et A.C.P.) s'avère plus authentique, [5].

V ■ CLASSIFICATION ET PRÉDÉTERMINATION DE LA DURÉE DE VIE DES BARRAGES RÉCENTS

La première application de cette taxonomie a été faite pour apparenter les barrages récemment mis en service et la prédétermination de leurs durées de vie.

L'identification de ces taxons est une étape fastidieuse mais indispensable pour : l'aménagement des bassins versants par des moyens de lutte contre l'érosion, la meilleure gestion des capacités des barrages et la planification des programmes de dévasement ou de surélévation.

La durée de vie du barrage sera calculée comme le rapport entre 80 % de la capacité et le volume d'envasement moyen, [6]. Les résultats sont donnés par le tableau 6.

La classe de chaque barrage est déterminée dans une première étape par l'étude des caractéristiques physiques et hydrographiques (superficie, coefficient d'écoulement, indice d'altitude). L'ensemble des nouveaux barrages étudiés s'apparentent aux catégories Ib et II. Les valeurs calculées de la durée de vie sont variables. Il convient de signaler que les barrages dont la durée de vie est courte (B. Amrane, S. Yacoub, Deurdeur) sont à aménager en priorité c'est-à-dire mettre au point un protocole d'exploitation bien particulier en vue de synchroniser l'ouverture des vidanges de fond et effectuer des chasses de sédiments, et rechercher d'éventuels courants de densité et surélévation.

Quelques auteurs donnent des modèles de détermination de la durée en supposant la diminution, dans le temps, du

Tableau 6 : Classification et durée de vie des barrages récents.

Barrages	Date mise en service	Class	Volume. d'env. moy. (Mm ³ /an)	Superficie (km ²)	Taux d'abrasion (m ³ /km ² /an)	Capacité initiale (Mm ³)	Durée de vie (an)
Deurdeur	1984	II	1,05	468	2244	115	88
S. Yakoub	1985	II	2,26	920	2457	264	93
Gargar	1988	Ib	0,57	2900	197	450	632
Keddara	1985	II	0,19	93	2043	146	615
Bouroumi	1985	II	0,31	150	2067	188	485
Guenitra	1984	II	0,43	202	2129	125	233
B. Amrane	1987	Ib	0,66	3700	178	16,5	20
Ouzert	1987	Ib	0,47	2100	224	100	170
H. Debagh	1987	Ib	0,31	1070	290	220	568
A. Zada	1986	Ib	0,47	2080	226	125	213
S. Abdelli	1988	Ib	0,32	1135	282	110	275

3. Durée de vie des barrages (mis en service entre 1984/1988)

taux d'abrasion à cause du tassement des horizons de vase inférieurs [7]. Or nos corrélations se basent sur un taux d'abrasion moyen, il serait donc intéressant d'étudier l'évolution dans le temps de la vitesse d'envasement pour les barrages possédant plusieurs mesures bathymétriques afin de tester la véracité de ces hypothèses de travail dans des conditions propres à l'Algérie.

La figure 3 montre une comparaison entre la durée de vie théorique et la durée de vie donnée par notre modèle.

On remarque, après une dizaine d'années d'exploitation, que la durée de vie donnée par nos modèles reflète mieux l'état réel actuel de l'envasement des cuvettes de ces ouvrages.

La figure 4 montre l'état actuel de l'avancement de l'envasement du barrage de Beni Amrane (mis en service en 1987) donné par notre modèle et confirmé par la réalité du terrain, [8].

4. Durée de vie du barrage de Beni Amrane (mis en service 1987).

VI ■ CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La mise au point d'une méthodologie simple et pratique pour la quantification de la sédimentation était toujours un objectif attractif. Les résultats des campagnes topo-bathymétriques au niveau de dix-neuf barrages ont permis donc à la fois la partition d'un échantillon et l'utilisation de ses taxons comme classification. Si du point de vue temporel elles ne sont pas homogènes (synchrones), elles ont cependant l'avantage d'intégrer tous les types de sédiments (en suspension, charrié, érosion des berges, dépôts et reprises), et l'inconvénient de ne pas inclure la partie du transport solide déversée pendant les crues [9].

La sédimentation des ouvrages dépend donc essentiellement de la taille du bassin versant, des précipitations, de l'apport liquide (coefficient d'écoulement) et du relief

(indice d'altitude). Ce dernier paramètre indique que la majorité des bassins versants sont plus ou moins montagneux, ce qui induit une certaine rudesse du climat avec un effet de continentalité (éloignement de la mer), donc une localisation soit en montagne soit sur les hauts plateaux.

Ce travail est une contribution à l'étude de la sédimentation des barrages situés en zone semi-aride ; il peut être encore enrichi en respectant les propositions suivantes :

- étude systématique des bassins versants de ces ouvrages par modélisation numérique de terrain (M.N.T.),
- élaboration d'un fichier maghrébin d'exploitation des barrages ayant pour objectif d'actualiser les bilans hydrauliques (apports, pertes, évaporation...),
- application d'un protocole d'exploitation rigoureux et standardisé au niveau de ces ouvrages,
- réalisation de campagnes bathymétriques périodiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KARAOUCHOV A.V., 1977. Les débits solides, analyse et répartition géographiques. Hydrométéoizdat, Leningrad, 238 p.
- [2] KASSOUL M., 1991. Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie Mémoire fin d'études, Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, 66 p. et annexes.
- [3] MUDRY J., 1991. L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. Revue sci. de l'eau n°4, p.19-37.
- [4] BOBEE B., LACHANCE M., POTVIN L., 1981. Analyse multivariée et interprétation géochimique de la variabilité spatiale de la quantité de l'eau et des rivières du Québec méridional. Journal of Hydrology n°53, p.95-116.
- [5] KASSOUL M., ABDELGADER A., BELORGEY M., 1997 Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. Revue sci. de l'eau n°10(3), p.339-358.
- [6] SOGREAH, ANRH, 1989. Etude méthodologique sur l'hydrologie des retenues colinéaires et mise au point d'outils de calculs à l'usage des directions de l'hydraulique. Rap. tech. n°5, Grenoble, 156 p.
- [7] RAMPON A., 1977 Sédimentation des barrages, érosion et transport sédimentaire, 210 p. France.
- [8] KASSOUL M.; BELORGEY M.; 1998 Contribution à l'étude de l'alluvionnement des ouvrages hydrotechniques des pays du Maghreb, 25èmes journées de l'hydraulique, S.H.F., Chambéry. France, Tome 2 pp. 461-472.
- [9] JOHNSON G., 1983. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride, envasement et dévasement des retenues en Algérie. Rapport PNUD - SOGREAH-ANRH, 28p.