Document generated on 04/23/2024 3:08 a.m.

Revue des sciences de l'eau
Journal of Water Science

Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie
Characterization of dams sedimentation in Algeria

M. Kassoul, A. Abdelgader and M. Belorgey

Volume 10, Number 3, 1997

URI: https://id.erudit.org/iderudit/705283ar
DOI: https://doi.org/10.7202/705283ar

See table of contents

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)
1718-8598 (digital)

Explore this journal

Cite this article

Kassoul, M., Abdelgader, A. & Belorgey, M. (1997). Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, *10*(3), 339–358. https://doi.org/10.7202/705283ar

Article abstract

Deposition of sediments reduces available water reserves by 2 to 5% annually in the man-made reservoirs of the Maghreb countries. The sedimentation problem in the reservoirs in Algeria is known in the world because of its great importance. Measurement of reservoir siltation is important for quantifying deposits and for the management of the hydraulic structures.

The A.N.R.H. (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) first attempted to monitor sediment loads by measuring the transport of suspended particles (solids) at hydrometric stations in a punctual and irregular manner (draw-off by section without measuring the flow velocity), but the real value of a stream's sediment load is not necessarily well reflected by point sampling (TOUAT, 1989; TOUAT 1991). Therefore, small experimental drainage basins (several hectares in surface area) were equipped to study sedimentation in the hydraulic structures solely by slope erosion (RAMDANE, 1989). The specific rate of erosion in catchment areas in northern Algeria is the highest in the Maghreb. Often it is over 2000 T/km_/year in the majority of the Tellian Altas basins, and it reaches 4000 T/km_/year in the Dahra coastal catchments. These latter values are among the highest in the world (DERI and HUSSON, 1976; HEUSCH, 1970). Variation of sediment transport across the wetted cross section was demonstrated by gauging the suspended particles transport (Tss). Measurement of the transport of bed material is not reliable, and often it is estimated as a percentage of the Tss.

The aim of the present study was to improve sedimentation estimates in order to define proper hydrotechnical structures and to increase their lifetime (reducing the costs).

Firstly, we consider information stemming from the topo-bathymetric processing of 19 reservoirs in Algeria. From the temporal point of view, the information is not homogeneous (not synchronous) but has the advantage of integrating all the types of sediments (suspended sediments, bed-load, bank erosion, deposits). The first analysis involved the topo-bathymetric survey of basins done by the A.N.B. (Agence Nationale des Barrages) (DERI, 1977; SOGREAH and A.N.R.H., 1989) whose data were used as the basis for the calibration of our models. These latter data then allow one to predict the lifetime of recent reservoirs. Calibration consists of defining the most influential hydroclimatic or physico-geographic factors affecting the abrasion rate.

We therefore considered 19 Algerian reservoirs located on basins distributed over a large part of the country. A first analysis led to the identification of the variability of the hydromorphometric (elevation index, drainage density, slope index, flow coefficient, etc.) and the climatic (subhumid, semiarid, arid) characteristics of the studied sample. The evolution of the volumes of sediments from two topo-bathymetric measurements, which were carried out on two different dates, shows a variation between 0.017 Mm3/year and 2.490 Mm3/year. This sedimentation resulted in a loss of initial capacity, which caused the termination of life for some reservoirs. The initial capacity of the 19 considered reservoirs was about 1900 Mm3; it was reduced to 1070 Mm3 in 1986. This constitutes a loss of 44% of the initial volume.

These latter results were exploited with the aim of setting up a simple model for estimating sedimentation and classifying the Algerian reservoirs. To this end, we graphed the preferential links between sedimentation, surface area, and the different hydromorphometric factors. Three determining factors were identified: the surface of drainage basin, the elevation index and the flow coefficient. These latter parameters allowed a spatial partitioning of the examined sample into three groups relating to the continentality (elevation index) and to the geographical context: class Ia represents the catchment basins of the high plateau zone (hard and semiarid climate, a low abrasion rate); class Ib corresponds to an intermediate position (with a moderate physico-geographic characteristic, the cross between two climates: semiarid and subhumid); and class II shows the coastal drainage basins that are influenced by the subhumid climate (an important abrasion rate). Essentially, sedimentation within the hydraulic structures depends on the precipitation, the surface area of the catchment, the inflow (flow coefficient) and the relief (elevation index).

In order to validate these first results, we further analyzed the data table corresponding to the hydromorphometric factors and the abrasion rates. The study of such a data table is generally carried out by interpreting the information by means of multidimensional statistical methods (principal components analysis, factorial discriminant analysis, factorial correspondence analysis, etc.). These descriptive methods, which disregard part of the initial information, yield an explanation of the structure of the data table in terms of hydrokinematics (ROLET and SEGUIN, 1986a and b). Principal components analysis, based on multivariate analysis, implies a mode of deductive reasoning (MUDRY, 1991). Application of this approach showed the presence of sub- groups, based on hydromorphometric criteria, which resembled those obtained earlier in the graphical analysis. This method also corroborated the formulated observations in the classification analysis (graphical analysis).

Calibration of the mathematic functions, based on the minimization of errors by the least squares method, on the data series of "abrasion rate surface" according to the observed data of deposits, showed a significant correlation between the observed and calculated values of the abrasion rate. These latter models did not integrate all the determining factors, but they can be useful for predicting the lifetime of recent reservoirs. These last tasks complete the results obtained from the previous models based on the classification (graphical, principal components analysis) and reveal great efficient means.

To validate our models, we extended our application to the other sites presenting neighbouring conditions. We then inserted in our abacus the deposition values for seven Tunisian reservoirs and sixteen Moroccan reservoirs. The three countries (Algeria, Tunisia, Morocco) are situated in the same physico-geographical conditions. The Tunisian and Moroccan reservoirs behave similarly to those in Algeria and present a high abrasion rate.

Another task is the application of the taxonomy already defined (classification abacus model) to recent reservoirs to determine their lifetime. Regarding the obtained results, it turns out that the reservoirs that have a short calculated lifetime must be fitted out first, and a specific protocol for their exploitation must be established.

Finally, we can imagine the use of our abacus to include the bathymetric results of the reservoirs in order to analyze the evolution of the abrasion rate in small catchment areas. It is suggested that further investigation be undertaken in order to better understand the hierarchical organization of the factors that govern sedimentation in the Maghreb.

Tous droits réservés © Revue des sciences de l'eau, 1997

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

érudit

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

REVUE DES SCIENCES DE L'EAU, Rev. Sci. Eau 3(1997) 339-358

Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie

Characterization of sedimentation in reservoirs in Algeria

M. KASSOUL[1], A. ABDELGADER[1] et M. BELORGEY[1]

Reçu le 29 avril1996, accepté le 10 avril 1997*.

SUMMARY

Deposition of sediments reduces available water reserves by 2 to 5% annually in the man-made reservoirs of the Maghreb countries. The sedimentation problem in the reservoirs in Algeria is known in the world because of its great importance. Measurement of reservoir siltation is important for quantifying deposits and for the management of the hydraulic structures.

The ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) first attempted to monitor sediment loads by measuring the transport of suspended particles (solids) at hydrometric stations in a punctual and irregular manner (draw-off by section without measuring the flow velocity), but the real value of a stream's sediment load is not necessarily well reflected by point sampling (TOUAT, 1989; TOUAT 1991). Therefore, small experimental drainage basins (several hectares in surface area) were equipped to study sedimentation in the hydraulic structures solely by slope erosion (RAMDANE, 1989). The specific rate of erosion in catchment areas in northern Algeria is the highest in the Maghreb. Often it is over 2,000 T/km≤/year in the majority of the Tellian Altas basins, and it reaches 4,000 T/km≤/year in the Dahra coastal catchments. These latter values are among the highest in the world (DERI and HUSSON, 1976; HEUSCH, 1970). Variation of sediment transport across the wetted cross section was demonstrated by gauging the suspended particles transport (Tss). Measurement of the transport of bed material is not reliable, and often it is estimated as a percentage of the Tss.

The aim of the present study was to improve sedimentation estimates in order to define proper hydrotechnical structures and to increase their lifetime (reducing the costs).

Firstly, we consider information stemming from the topo-bathymetric processing of 19 reservoirs in Algeria. From the temporal point of view, the information is not homogeneous (not synchronous) but has the advantage of integrating all the types of sediments (suspended sediments, bed-load, bank erosion, deposits). The first analysis involved the topo-bathymetric survey of basins

1. Université du Havre, Laboratoire de Mécanique des Fluides et Génie Civil, Quai Frissard BP 265, 76055 Le Havre Cedex (France).

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 20 mars 1998.

done by the ANB (Agence Nationale des Barrages) (DERI, 1977; SOGREAH and ANRH, 1989) whose data were used as the basis for the calibration of our models. These latter data then allow one to predict the lifetime of recent reservoirs. Calibration consists of defining the most influential hydroclimatic or physico-geographic factors affecting the abrasion rate.

We therefore considered 19 Algerian reservoirs located on basins distributed over a large part of the country. A first analysis led to the identification of the variability of the hydromorphometric (elevation index, drainage density, slope index, flow coefficient, etc.) and the climatic (subhumid, semiarid, arid) characteristics of the studied sample. The evolution of the volumes of sediments from two topo-bathymetric measurements, which were carried out on two different dates, shows a variation between 0.017 Mm^3/year and 2.490 Mm^3/year. This sedimentation resulted in a loss of initial capacity, which caused the termination of life for some reservoirs. The initial capacity of the 19 considered reservoirs was about 1900 Mm^3; it was reduced to 1,070 Mm^3 in 1986. This constitutes a loss of 44% of the initial volume.

These latter results were exploited with the aim of setting up a simple model for estimating sedimentation and classifying the Algerian reservoirs. To this end, we graphed the preferential links between sedimentation, surface area, and the different hydromorphometric factors. Three determining factors were identified: the surface of drainage basin, the elevation index and the flow coefficient. These latter parameters allowed a spatial partitioning of the examined sample into three groups relating to the continentality (elevation index) and to the geographical context: class Ia represents the catchment basins of the high plateau zone (hard and semiarid climate, a low abrasion rate); class Ib corresponds to an intermediate position (with a moderate physico-geographic characteristic, the cross between two climates: semiarid and subhumid); and class II shows the coastal drainage basins that are influenced by the subhumid climate (an important abrasion rate). Essentially, sedimentation within the hydraulic structures depends on the precipitation, the surface area of the catchment, the inflow (flow coefficient) and the relief (elevation index).

In order to validate these first results, we further analyzed the data table corresponding to the hydromorphometric factors and the abrasion rates. The study of such a data table is generally carried out by interpreting the information by means of multidimensional statistical methods (principal components analysis, factorial discriminant analysis, factorial correspondence analysis, etc.). These descriptive methods, which disregard part of the initial information, yield an explanation of the structure of the data table in terms of hydrokinematics (ROLET and SEGUIN, 1986a and b). Principal components analysis, based on multivariate analysis, implies a mode of deductive reasoning (MUDRY, 1991). Application of this approach showed the presence of sub-groups, based on hydromorphometric criteria, which resembled those obtained earlier in the graphical analysis. This method also corroborated the formulated observations in the classification analysis (graphical analysis).

Calibration of the mathematic functions, based on the minimization of errors by the least squares method, on the data series of "abrasion rate surface" according to the observed data of deposits, showed a significant correlation between the observed and calculated values of the abrasion rate. These latter models did not integrate all the determining factors, but they can be useful for predicting the lifetime of recent reservoirs. These last tasks complete the results obtained from the previous models based on the classification (graphical, principal components analysis) and reveal great efficient means.

To validate our models, we extended our application to the other sites presenting neighbouring conditions. We then inserted in our abacus the deposition values for seven Tunisian reservoirs and sixteen Moroccan reservoirs. The three countries (Algeria, Tunisia, Morocco) are situated in the same physico-

geographical conditions. The Tunisian and Moroccan reservoirs behave similarly to those in Algeria and present a high abrasion rate.

Another task is the application of the taxonomy already defined (classification abacus model) to recent reservoirs to determine their lifetime. Regarding the obtained results, it turns out that the reservoirs that have a short calculated lifetime must be fitted out first, and a specific protocol for their exploitation must be established.

Finally, we can imagine the use of our abacus to include the bathymetric results of the reservoirs in order to analyze the evolution of the abrasion rate in small catchment areas. It is suggested that further investigation be undertaken in order to better understand the hierarchical organization of the factors that govern sedimentation in the Maghreb.

Key words : *sedimentation, reservoirs, models, classification, statistics, lifetime.*

RÉSUMÉ

Le problème de la sédimentation des barrages en Algérie est connu dans le monde de par son importance. Devant cet état de fait la mesure de l'envasement des barrages présente un intérêt certain pour la quantification des sédiments et l'exploitation des ouvrages.

L'objectif de cette étude est de contribuer à la quantification de l'alluvionnement afin de mieux cerner le dimensionnement des ouvrages hydrotechniques, d'accroître leur durée de vie et de réduire les coûts de réalisation.

L'étude porte sur un échantillon de dix neuf barrages algériens situés dans des bassins versants répartis sur l'ensemble du territoire. Une première réflexion a conduit à identifier la diversité des caractéristiques hydromorphométriques (indice d'altitude, densité de drainage, indice de pente, coefficient d'écoulement,...) et climatiques (sub-humide, semi-aride, aride). L'évaluation des volumes des sédiments à partir des mesures topo-bathymétriques effectuées à deux dates différentes montre une perte dans la capacité initiale, soit 44 % de perte en volume total, qui arrive à la limite de la durée de vie pour certains barrages.

Ces derniers résultats ont été exploités dans l'objectif de mettre au point un modèle simple d'évaluation du débit solide accumulé dans les cuvettes des barrages algériens. À partir de cette réflexion, nous avons cherché, graphiquement, les liens préférentiels entre la sédimentation, la superficie et les différents facteurs hydromorphométriques. On distingue trois facteurs déterminants : la superficie, l'indice d'altitude et le coefficient d'écoulement. Ces derniers paramètres ont permis de mettre au point un abaque de classification en fonction de la continentalité et le contexte géographique. Cette taxonomie a été confirmée par l'analyse en composantes principales des données hydromorphométriques des systèmes étudiés.

Mots-clés : *sédimentation, barrages, modèles, facteurs hydroclimatiques, durée de vie.*

1 – INTRODUCTION

Le calcul de la sédimentation 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 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.

Ces processus « à discontinuité temporelle et spatiale » restent difficiles à quantifier individuellement, chacun d'entre eux étant étroitement lié au « chaînon amont ou aval ». Par contre, la mesure des sédiments au niveau des barrages est un résultat intégrant tous ces processus (érosion-transport-sédimentation) ; elle reflète une réalité objective et globale même si elle ne s'intéresse pas à reconstituer dans le détail le cheminement de ces sédiments. Son seul inconvénient réside dans l'incertitude à évaluer le taux des sédiments déversés vers l'aval par les évacuateurs de crues. L'expérience mondiale évalue ce taux entre 3 % et 10 % du volume global des sédiments emmagasinés (GAZZOLO et BASSI, 1969 ; KARAOUCHOV, 1977). Il ne peut être une source d'erreur excessive, c'est pour cela que notre choix s'est arrêté sur ce dernier type de mesure effectuée à l'aide de levées topo-bathymétriques au niveau de dix neuf barrages algériens.

Les formules classiques de type : Tixeron, SOGREAH, Fournier (FOURNIER, 1960 ; SOGREAH, 1982 et 1984 ; TIXERON, 1960) n'intègrent pas toute la chaîne du transport de la matière solide qui aboutit à la sédimentation dans les barrages. Leur insuffisance réside dans l'estimation du transport solide en suspension seul, et ne tient pas compte du transport solide charrié, et surtout qu'il est difficile de transformer des charges solides (en tonnes) en volumes de sédiments suite à la variabilité spatio-temporelle de la densité des sédiments (d'un barrage à l'autre : suivant la situation amont ou aval, en surface ou en profondeur dans une même cuvette). Certaines formules (Peter-Meyer, Heusch) mises au point à l'échelle mondiale ou régionale sont souvent appréciées et nécessitent un recalage pour les conditions locales (ADJEL et SMAIL, 1985 ; HEUSCH, 1970). D'autres équations ou abaques (A.N.R.H., HUSSON) présentent une complexité dans leurs applications et nécessitent parfois l'élaboration de cartes lithologiques et des calculs fastidieux (DERI, 1977 ; HUSSON, 1975 ; JOHNSON, 1983).

L'infrastructure hydraulique des pays du Maghreb est amputée annuellement de 2 % à 5 % de la réserve globale (DEMMAK, 1982). La capacité initiale des 19 barrages algériens examinés dans le cadre de cette étude était d'environ 1 900 Mm^3, elle s'est réduite à 1 070 Mm^3 en 1986, soit 44 % de perte en volume (KASSOUL, 1991). La perte en capacité de stockage de ces ouvrages hydrauliques se voit croître sans cesse au fil des temps en raison d'une érosion hydrique importante favorisée par l'agressivité du climat, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action de l'homme. Ce phénomène est d'autant plus grave que les solutions de remplacement telles que le choix de nouveau sites ou les surélévations des ouvrages existants sont devenus rares. Les réflexions sont portées actuellement sur l'examen de possibilité de dévasement et surtout l'adaptation des consignes de gestion de retenues qui minimisent l'impact de cet envasement.

Devant cet état de fait, la mesure de l'envasement des barrages présente un intérêt certain pour la quantification des sédiments et l'exploitation des ouvrages (mise à jour, correction des courbes de remplissage des retenues).

2 – CARACTÉRISTIQUES HYDROMORPHOMÉTRIQUES DES BARRAGES ETUDIÉS ET LEURS BASSINS VERSANTS

Les différents barrages étudiés sont situés dans des bassins versants répartis sur une zone qui couvre une partie importante du territoire algérien *(fig. 1)*, de par son relief varié (montagne, plaine), la diversité de sa végétation (forêts, broussailles, prairies, ...) et son climat (sub-humide, semi-aride, aride).

La majeure partie des dix neuf bassins versants ont une pluviométrie moyenne interannuelle comprise entre 300 et 600 mm, le climat semi-aride y étant fortement représenté. Cinq barrages 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 (BINNIE and PARTNERS, 1982 ; BODY, 1989).

Le tableau 1 montre l'ensemble de leurs paramètres géométriques et hydromorphométriques :

Tableau 1 Caractéristiques hydromorphométriques des systèmes étudiés.

Table 1 *Hydromorphometric characteristics of the studied systems.*

Barrage	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	0,13	3,5	0,60	0,130	56	70	0,80
SMBA	Mina	–	–	1,82	0,060	235	120	1,96
Hamiz	Arbatache	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	Bounamous	0,17	3,1	1,96	0,300	171	140	1,22
Ksod	Ksod	0,13	4	1,10	0,100	31	51,5	0,60
Foum elgherza	Elabiod	–	5,5	1,38	0,040	47	21	2,24
Foum 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	Elhammam	–	–	1,28	0,040	73	138,8	0,52
Fergoug	Elhammam	–	–	1,78	0,040	18	151	0,12
Djorf Ettorba	Guir	–	–	–	0,060	360	200	1,80
Beni Bahdel	Tafna	0,09	2,4	0,92	0,160	63	73,9	0,85
Maffrouche	Maffrouche	0,16	2	0,34	0,270	15	16	0,94

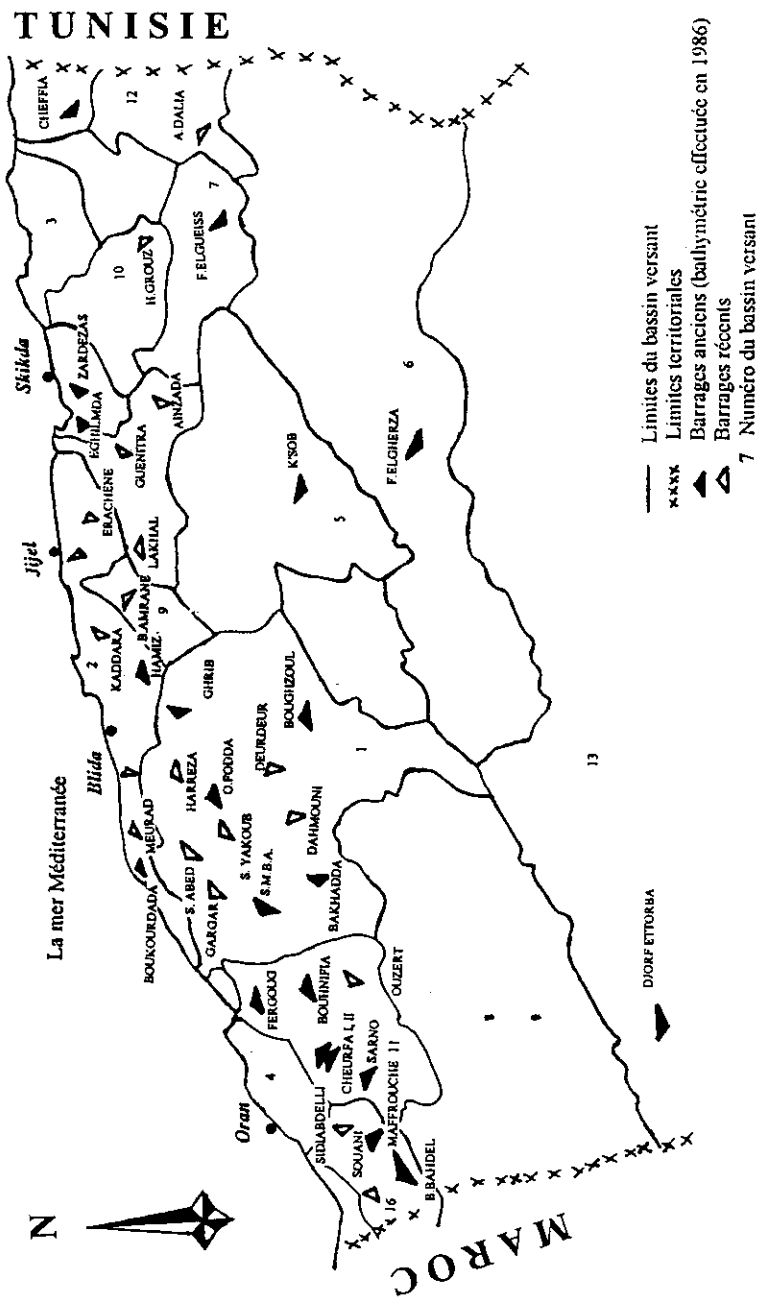


Figure 1 Situation géographique des systèmes étudiés.
Geographical location of the studied systems.

– L'indice de pente (Ip) est la pente moyenne. Il permet de tenir compte de l'influence du facteur pente sur le régime hydrologique et de comparer la topographie de divers impluviums. Il montre des valeurs importantes pour les bassins versants des oueds Gheiss, Arbatache et Agrioum ; cela laisse présager, relativement, une forte concentration du ruissellement dans ces derniers bassins.

– La densité de drainage (Dd) est définie comme la longueur moyenne du réseau hydrographique par kilomètre carré de l'aire du bassin. Ce paramètre est utile dans l'étude des crues (RÉMÉNIÉRAS, 1986). On note une densité de drainage relativement forte pour les bassins versants des oueds d'Elabiod et Fodda indiquant l'importance des crues dans ces secteurs.

– Le coefficient d'altitude (Dh) est le rapport entre la dénivelée et l'altitude moyenne du bassin versant. L'ensemble des bassins présente une variabilité du relief : des bassins montagneux tels que Maffrouche, Mina (à Tiaret), des bassins avec dominance de plaine tels que Bounamous, Mina (à Relizane) et des bassins intermédiaires tels que Elabiod et Ksob.

– Le coefficient d'écoulement (Ce) est le rapport entre la lame d'eau interannuelle écoulée (observée) et la pluviométrie interannuelle calculée au niveau des bassins versants. Les bassins des oueds Arbatache et Bounamous possèdent les plus forts coefficients d'écoulement ; cela est dû à l'importance des précipitations mesurées.

– La capacité initiale (C) des barrages étudiés présente le volume d'eau maximal que peut contenir le barrage au début de son exploitation (avant l'envasement). Le barrage de Djorf Ettorba possède une forte capacité (360 Mm^3) ; par contre la plus faible capacité est attribuée au barrage de Foum Elgheiss (3 Mm^3).

– L'apport liquide interannuel (A) constitue les apports en volume d'eau interannuels calculés, à partir des bilans hydrologiques, sur une période s'étendant généralement de la date de mise en service du barrage jusqu'à l'année 1986. Le barrage de Djorf Ettorba possède le plus fort taux d'apport liquide.

– Le rapport capacité initiale du barrage – apport liquide interannuel (C/A) nous renseigne sur la rentabilité des différents barrages et le type de régularisation effectuée par l'ouvrage. Il présente des valeurs considérables pour les barrages de oued Fodda et Sarno, dont les bassins versants sont caractérisés par de faible apport liquide. Par contre pour le barrage de Fergoug, il est minimal, indiquant l'importance de sa productivité relative. On constate que deux tiers des barrages étudiés font de la régularisation saisonnère et possèdent une bonne rentabilité.

3 – ÉVALUATION DES VOLUMES DES SÉDIMENTS

Les données de base ont été élaborées par la Compagnie Géophysique de France et traitées par contrat avec l'Agence Nationale des Barrages (ANB). Avant de commencer les travaux de terrain, il a d'abord été tracé le plan du réseau des profils de mesure. Ce réseau a été réalisé afin de lier les différents plans topographiques effectués à des dates différentes. Les travaux de terrain ont débuté par la vérification de canevas de triangulation et de polygonation, des appareils de précision ont été employés pour réaliser les mesures (la précision est au centimètre prés). Le lever topographique de la partie terrestre comportait la zone du réser-

voir entre le niveau de l'eau au moment de la mesure et le niveau des plus hautes eaux. Les mesures bathymétriques (zone immergée) ont été réalisées à partir d'une 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 levés se basent sur les points connus d'après la triangulation ou 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. 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.

Tableau 2 Quantification de l'alluvionnement des barrages étudiés.

Table 2 *Deposits quantification of the studied dams.*

Barrage	Superficie du BV km^2	Capacité initiale Mm^3	Période de calcul	Envasement moyen Mm^3/an	Capacité en 1986 Mm^3	Perte en capacité %
Boughzoul	19 740	55	1934/1986	0,570	20,38	62,94
Ghrib	23 300	280	1939/1986	2,490	138,57	50,51
O. Fodda	790	228	1932/1986	2,246	132,30	41,97
Bakhadda	1 275	56	1963/1986	0,082	45,44	18,85
SMBA	6 100	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	1 470	31	1977/1986	0,395	12,43	59,90
Foum Elgherza	1 300	47	1950/1986	0,590	25,76	45,19
Foum Elgheiss	153	3	1939/1986	0,030	1,60	46,66
Sarno	264	22	1954/1986	0,414	21,57	1,95
Cheurfa	4 015	14	1882/1967	0,061	9	35,71
Bouhnifia	7 850	73	1944/1967	0,913	52	28,76
Fergoug	8 274	18	1970/1986	0,881	3,90	78,33
Djorf Ettorba	22 000	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

Cet échantillon de 19 barrages pêche par le manque d'uniformité des périodes d'observations, l'irrégularité des levées topo-bathymétriques et une distribution spatiale aléatoire des ouvrages. L'envasement moyen obtenu montre des valeurs un peu disparates qui varient dans une fourchette allant de 0,017 Mm^3/an (cas du barrage Maffrouche dont le bassin versant est le plus petit, 85 km^2) à 2,490 Mm^3/an (barrage 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 accaparé par des forêts de chênes, lesquelles jouent un rôle capital dans la lutte contre l'érosion.

Les données recueillies ont permis d'évaluer à près de 0,78 Mm^3 *(tabl. 2 et 3)* en moyenne la capacité perdue chaque année par envasement sur une capacité totale de stockage de 1 900 Mm^3 . La capacité déjà perdue à nos jours dépasse les 10^3 Mm^3 . Les barrages Ghrib, O. Fodda et Boughzoul dont la réserve totale dépasse 30 % du potentiel hydraulique total mobilisé sont pratiquement irremplaçables. Les pertes de capacité par envasement de nos retenues ont fait que :

– cinq barrages ont fait déjà l'objet de travaux de surélévation pour rétablir le volume perdu : Boughzoul, Bakhadda, Zardezas, Ksob et Fergoug.

– six retenues de barrages sont envasées à plus de 50 % de leur capacités initiales : Boughzoul, Ghrib, Hamiz, Zardezas, Ksob et Fergoug.

4 – MISE EN FORME DES DONNÉES ET CALAGE DU MODÈLE

L'objectif est l'exploitation des résultats de mesures des volumes de sédimentation afin de mettre au point un modèle (formule, abaque, loi de distribution, partition en classes, ...) d'évaluation de l'envasement des barrages. Ce modèle, en plus de la possibilité de quantification, doit permettre d'effectuer une prévision de l'alluvionnement des ouvrages nouvellement mis en service.

4.1 Mise en forme des données

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.

Des facteurs tels que 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 établis plus loin.

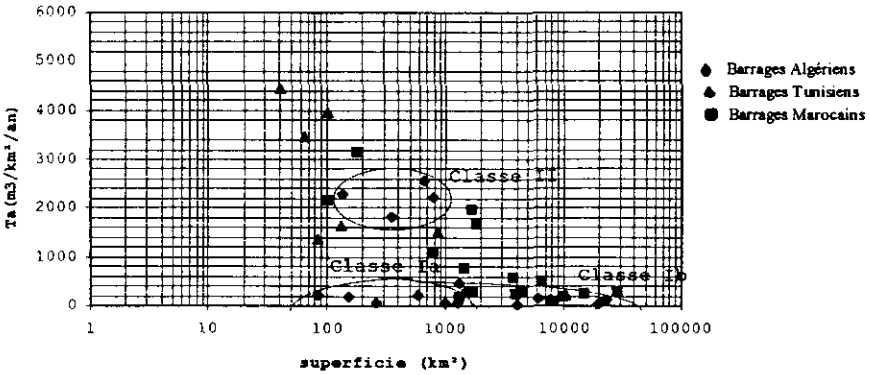


Figure 2 Classification graphique des barrages étudiés, selon : l'indice d'altitude, le coefficient d'écoulement.

Graphical classification of the studied dams, versus: elevation index, flow coefficient.

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 est ramené à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne *(tabl. 3)*.

Le barrage Eghilmda possède un taux d'abrasion maximal. Son bassin versant côtier cumule de fortes précipitations (coefficient d'écoulement considérable). Par contre le barrage de Cheurfa présente une valeur faible du taux d'abrasion. L'impluvium continental de ce dernier est faiblement arrosé (faible coefficient d'écoulement).

Le taux d'abrasion montre globalement une forte dégradation spécifique des bassins versants contrôlés par les barrages de O. Fodda, Hamiz, Eghilmda et Zardezas. En effet la tranche morte des barrages étudiés est totalement envasée. Le rythme d'envasement est important surtout pour les barrages de grande taille *(tabl. 3)*, tels que : Ghrib, O. Fodda, SMBA et Djorf Ettorba.

4.2 Calage manuel

La recherche des liens préférentiels entre la sédimentation et les facteurs retenus est effectuée d'abord graphiquement. 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. Le report des variables explicatives sur le graphique Ta = f(s) permettrait d'étudier l'éventuelle partition de la population.

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 le coefficient d'écoulement (Ce),

– Ta en fonction de la surface (S) et l'indice d'altitude (Dh).

Tableau 3 Taux d'abrasion dans les barrages étudiés.

Table 3 *Abrasion rates of the studies dams.*

Barrage	Superficie du BV km²	Pluviométrie interannuelle mm	Envasement moyen Mm³/an	Taux d'abrasion m³/km²/an
Boughzoul	19 740	300	0,570	28,85
Ghrib	23 300	331	2,490	129,00
O. Fodda	790	535,5	2,246	2 233
Bakhadda	1 275	430	0,082	76,23
SMBA	6 100	330,8	1,170	160,41
Hamiz	137	790	0,155	2 289
Eghilmda	650	946	1,832	2 558
Zardezas	346	642	0,450	1 825
Cheffia	575	798,5	0,124	217
Ksob	1 470	370,7	0,395	268
Foum Elgherza	1 300	388,2	0,590	454
Foum Elgheiss	153	456,6	0,030	191
Sarno	264	459	0,414	54
Cheurfa	4 015	389	0,061	16
Bouhnifia	7 850	460	0,913	118
Fergoug	8 274	460	0,881	104
Djorf Ettorba	22 000	150	2,290	105
Beni Bahdel	990	450	0,107	56
Maffrouche	85	668,2	0,017	205

Seuls, le coefficient d'écoulement et l'indice d'altitude permettent la différentiation des 19 barrages en trois groupes relativement bien distincts *(fig. 2)*. Chaque classe est définie par un domaine de variation des paramètres Ta, S, Ce et Dh *(tabl. 4)*.

La liaison entre la partition typologique obtenue et le contexte géographique des barrages permet de constater une répartition spatiale en fonction de la continentalité : la classe II présente les bassins côtiers influencés par le climat sub-humide (taux d'abrasion et coefficient d'altitude élevés) ; la classe I caractérise les bassins continentaux. Dans cette dernière classe, le groupe Ia détermine les impluviums de la zone des hauts plateaux avec son climat rude et semi-aride ; le groupe Ib montre globalement une situation intermédiaire entre II et Ia, il présente des caractéristiques moyennes (coefficient d'altitude) et un climat subissant deux courants : le semi-aride et le sub-humide.

Tableau 4 Classification des barrages étudiés.

Table 4 *Classification of the studied dams.*

Classe	Superficie du BV km^2	Coefficient d'écoulement	Indice d'altitude	Taux d'abrasion m^3/km^2/an
Ia	< 1 000	0,1 à 0,3	< 1	< 500
Ib	> 1 000	< 0,15	1 à 2	< 500
II	< 1 000	0,2 à 0,5	1,5 à 2	> 1 700

Classe Ia : Bakhadda, Foum Elgheiss, Beni Bahdel, Maffrouche.
Classe Ib : Boughzoul, Ghrib, SMBA, Ksob, Foum Elgherza, Sarno, Cheurfa, Bouhnifia, Fergoug.
Classe II : Oued Fodda, Hamiz, Cheffia, Eghilmda, Zardezas.

On note que le barrage Cheffia, situé en zone côtière, apparaît dans la classe Ia suite à sa faible taille, mais l'importance de son indice d'altitude permet de le réaffecter à la classe II. Le barrage Sarno classé dans le groupe Ia possède un indice d'altitude qui dépasse la limite définie et pourrait être associé au groupe Ib. Ces constatations seront corroborées plus loin par l'analyse en composantes principales (ACP).

Une campagne systématique de mesures bathymétriques entreprise en 1976 en Tunisie par l'ORSTOM et la DRE avait pour but l'estimation de l'alluvionnement total de 7 barrages (SOGREAH et ANRH, 1989). On a inclu ces résultats dans l'abaque *(fig. 2)* afin de contrôler la véracité du modèle obtenu. Etant donné que les deux échantillons de barrages sont situés dans des conditions voisines, alors les partitions obtenues sont similaires. La quasi-totalité des barrages tunisiens sont réaffectés à la classe II car ils possèdent des taux d'abrasion très importants *(tabl. 5)*.

Tableau 5 Mesure de l'envasement dans les retenues de sept barrages en Tunisie.

Tableau 5 *Deposits quantification of seven dams in Tunisia.*

Barrage	Superficie du BV km^2	Date de mise en service	Capacité initiale 10^6 Mm^3	Temps d'observation an	Volume de sédiment 10^6 m^3	Taux d'abrasion m^3/km^2/an
Mellegue	10 300	1954	268	21,33	47,6	216,66
Nebhana	855	1965	86,4	10	12,9	1 508,7
Bezirk	84	1960	6,46	14,75	1,68	1 356
Chiba	64	1963	7,86	12	2,65	3 450
Masri	40	1968	6,82	7,5	1,32	4 400
Kasseb	101	1969	81,9	7,5	3	3 960
Lakhmess	131	1966	8	9,33	2,01	1 644,5

Le report des données de quelques barrages marocains sur notre graphique de classification *(fig. 2)*, montre globalement une répartition similaire à celle des barrages algériens et tunisiens. L'ensemble des barrages marocains sont regroupés dans les classes Ib et II. Les retenues, contrôlant des bassins versants de faible taille, possèdent de forts taux d'abrasion *(tabl. 6)*. La situation de l'envasement des retenues de barrages au Maroc est aussi alarmante (de l'ordre de 50 Mm^3/an). Leur classement en fonction de leur sensibilité à l'envasement a montré qu'un barrage est plus sensible à l'envasement lorsque sa capacité est faible, ou/et lorsque la concentration des apports arrivant dans la retenue est élevée (MARZOUKI, 1992).

Tableau 6 Mesure de l'envasement dans les retenues des barrages au Maroc.

Table 6 *Deposits quantification of dams in Morocco.*

Barrage	Superficie du BV km^2	Date de mise en service	Capacité initiale 10^6 m^3	Temps d'observation (ans)	Volume de sédiment 10^6 m^3	Taux d'abrasion $m^3/km^2/an$
Nakhla	107	1961	13	26	6,08	2 149,53
L. Takerkoust	1 710	1935	96	53	26,50	292,39
El Kansra	4 540	1935	330	53	64,66	268,72
M. Khattabi	780	1981	43	8	6,96	1 115,38
I. Batouta	178	1977	43,6	10	5,60	3 146,06
M. Youssef	1 440	1969	198	20	22,00	763,88
M. Ed Dahbi	15 000	1972	592	16	62,88	262
B. El Ouidane	6 400	1953	1 484	31	99,82	503,12
H. Addakhil	4 570	1971	369	16	20,96	286,65
Youssef BT	3 780	1972	320	17	16,49	256,61
SMBA	9 800	1972	509	13	22,97	180,61
O. Makhazine	1 820	1978	807	11	33,99	1 697,8
Hassan 1er	1 670	1986	272	3	10,00	1 994,01
Al Massira	28 500	1979	2 724	11	82,94	264,56
Idriss 1er	3 680	1973	1 217	14	30,94	600,54
Abdelmoumen	1 300	1981	216	6	1,38	176,92

4.3 *Calage automatique*

Les processus et les mesures étudiés présentent un caractère régional. L'analyse en composantes principales (ACP) est appliquée en vue de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus graphiquement. Cette méthode permettrait aussi d'identifier les facteurs régissant les phénomènes de l'envasement.

4.3.1 Principe de la méthode des analyses en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique exclusivement descriptive : son objectif est de présenter, sous forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données.

Le tableau des données traitées est constitué, en lignes, par des individus ou unités statistiques sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives disposées en colonnes. Le tableau est constitué de variables centrées et réduites, si le tableau de données comporte p variables quantitatives, les individus peuvent être représentés dans un espace à p dimensions dans lequel la visualisation du nuage de points est impossible. Alors le nuage est projeté, avec un minimum d'erreurs, dans des espaces à une dimension (c'est-à-dire des droites) ou, plus fréquemment, à deux dimensions (c'est-à-dire sur des plans). Ces plans sont caractérisés par les deux axes factoriels orthogonaux qui expliquent le maximum de la variance.

C'est le plan engendré par les axes I et II qui donne l'information visible maximum (plan principal). Selon la part d'information prise en compte par ce plan, il sera nécessaire ou non d'en examiner d'autres (plan : I-III, II-III, etc.). À chaque axe factoriel est associé un facteur. L'extraction des principaux facteurs responsables de la structure observées permet de décrire graphiquement le nuage, d'abord dans l'espace des variables, puis dans celui des individus.

On a fait appel à l'analyse en composantes principales afin de préciser les relations entre variables hydromorphométriques, les phénomènes à l'origine de ces relations ainsi que les relations communes ou spécifiques à chaque système (ABDELGADER, 1994).

L'analyse en composantes principales a été appliquée sur l'ensemble des données des barrages étudiés. Les variables prises en compte sont les paramètres explicatifs disponibles et ayant permis la subdivision de notre échantillon (calage manuel) : 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).

La répartition des variables montre que l'axe I oppose le pôle « coefficient d'écoulement, taux d'abrasion », qui sont corrélés entre eux, au pôle « surface » *(fig. 3)*. Cet axe représente les processus physiques (apports) issus des écoulements en fonction de la superficie. Il peut donc être baptisé « effet d'écoulement ». L'axe II est caractérisé par le coefficient d'altitude (coefficient de corrélation est – 0,80) et un peu par le rapport C/A (coefficient de corrélation est – 0,62), et peut représenter le relief des systèmes étudiés.

La distribution des individus (barrages) montre, globalement, trois groupes distincts *(fig. 4)* : le premier groupe, (classe II : O. Fodda, Hamiz, Eghilmda, Zardezas, Cheffia) caractérisé par de fortes valeurs des coefficients d'écoulement et taux d'abrasion , est opposé selon l'axe I (41,9 % de variance) au second groupe (classe Ib : Boughzoul, Ghrib, SMBA, Foum Elgherza, Sarno, Cheurfa, Bouhnifia, Fergoug) qui possède les plus grandes tailles de bassin. On distingue un troisième groupe hétérogène (classe Ia : Bakhadda, Foum Elgheiss, Beni Bahdel, Maffrouche, Ksob) dont les caractéristiques ne présentent aucun caractère particulier, sauf des faibles valeurs du rapport C/A et du Dh.

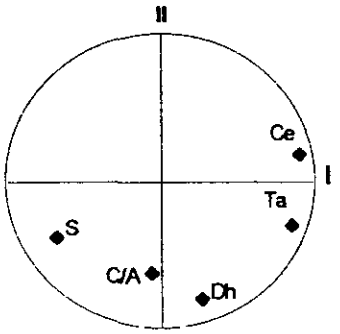
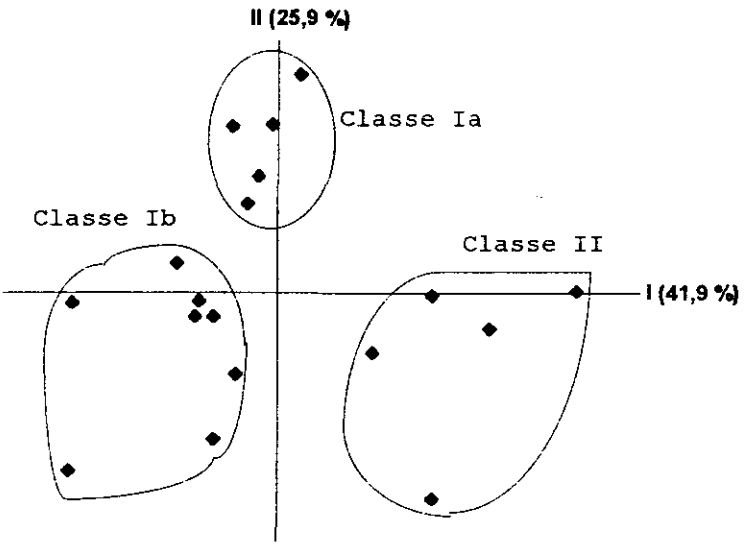


Figure 3 Analyse en composantes principales des données des barrages étudiés. Projection des variables sur le plan factoriel I-II.

Principal components analysis of the studied dams data. Variable space, I-II factor plan.



Fligure 4 Analyse en composantes principales des données des barrages étudiés. Projection des individus sur le plan factoriel I-II.

Principal components analysis of the studied dams data. Individual space, I-II factor plan.

On remarque que le barrage Cheffia se trouve apparenté à la classe II suite à l'importance de son coefficient d'écoulement (estimé sans tenir compte du boisement) et à sa superficie minimale. Le barrage Sarno est réaffecté à la classe Ib à cause de ses faibles valeurs du taux d'abrasion et du coefficient d'écoulement, et son altitude moyenne. Ces regroupements confirment les remarques déjà établies dans la classification graphique. On note que le barrage Ksob est plus pro-

che de la classe Ia car il possède des caractéristiques hydromorphométriques modestes.

Les groupes Ia, Ib et II déterminés par le calage graphique sont, globalement, mis en évidence dans l'ACP. Ces résultats corroborent donc les constatations formulées précédemment et l'approche graphique. En outre les relations entre les classes de barrages et les facteurs déterminants s'avèrent donc pertinentes.

Après l'analyse manuelle et celle 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 nous a permis d'établir le tableau 4.

4.4 Calage par la méthode des moindres carrés

Pour la recherche d'une relation entre le taux d'abrasion et la superficie, nous avons procédé à des calages de fonctions basés sur la méthode des moindres carrés (BOBBE *et al.*, 1981 ; LEBART *et al.*, 1982). Si une telle relation peut être établie, il sera possible de prévoir le taux d'abrasion en connaissant les facteurs déterminants.

Les équations testées sont de type linéaire, puissance et exponentiel :

$f(x) = ax + b$

$f(x) = ax^n + b$

$f(x) = ax^{-n} + b$

$f(x) = ae^x$

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

où x est la superficie en km^2 et f(x) est la valeur prédite du taux d'abrasion pour x donné.

On a retenu les équations ayant donné une erreur minimale et un coefficient de corrélation significatif *(tabl. 7)*.

Tableau 7 Équations du calage par la méthode des moindres carrés.

Table 7 *Results of functions calibration by the least squares method.*

Classe de barrages	Superficie km^2	Équation	Coefficient de corrélation	Erreur
Ia	S < 1 000	$Ta = 1\,433\ S^{-0,43} - 15,24$		± 64,20
Ib	S > 1 000	$Ta = 1\,846\ S^{-0,15} - 360$	0,853	± 172,48
II	S < 1 000	$Ta = 0,463\ S + 2\,026$		± 363,34

Les meilleurs calages donnent des valeurs du taux d'abrasion qui sont bien corrélées, au seuil de 1 %, aux valeurs observées avec un coefficient de corrélation de 0,853. L'utilité de ces modèles réside dans la prédiction des valeurs du taux d'abrasion dans les sites non étudiés ou en projet ; une fois la classe de l'ouvrage déterminée, à partir des caractéristiques physiques et hydromorphomé-

triques (abaque de classification), on peut choisir l'équation adéquate permettant l'estimation du taux d'abrasion.

L'extension des modèles établis aux retenues collinaires, révèle un grand intérêt dans l'analyse de l'évolution du taux d'abrasion dans les bassins versant de petites superficies (Sommar, Souaki, Medrissa,...) et dans les sites en projets en Algérie. La prévision de l'envasement d'un barrage permettra essentiellement la détermination de la durée de vie de la retenue. Cela est d'une importance capitale aussi bien au niveau de la conception de l'ouvrage, qu'au niveau de son exploitation. La qualité des prévisions pourrait être améliorée en tenant compte de tous les points essentiels qui interviennent dans les processus sédimentaires.

5 – 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 leur durée 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. Les résultats sont donnés au tableau 8.

La classe de chaque barrage a été 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 *(tabl. 8)*. En effet, malgré le jeune âge, ces barrages présentent de forts taux d'abrasion. Le rythme d'envasement est généralement semblable à celui des anciennes retenues. Si ce rythme continue à la même cadence, la majorité des nouveaux barrages pourront atteindre ou dépasser les 50 années de service sans diminution de capacité utile, et par voie de conséquence de garantie de fourniture.

Les valeurs calculées de la durée de vie sont variables. Les bassins versants des barrages dont la durée de vie est courte (B. Amrane, S. Yacoub, Deurdeur) sont à aménager en priorité ; il est donc important de mettre au point un protocole d'exploitation bien particulier en vue de synchroniser l'ouverture des vidanges de fond et d'effectuer des chasses de sédiments, et de rechercher d'éventuels courants de densité.

Quelques auteurs donnent des modèles de détermination de la durée en supposant la diminution, dans le temps, du taux d'abrasion à cause du tassement des horizons de vase inférieurs (BENBLIDIA, 1989 ; KARAOUCHOV, 1977). Or nos modèles 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.

Tableau 8 Classification et durée de vie des barrages récents.

Table 8 *Classification and life time values of recent dams.*

Barrage	Date de mise en service	Classe	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 (ans)
Deurdeur	1984	II	1,05	468	2 244	115	88
S. Yakoub	1985	II	2,26	920	2 457	264	93
Gargar	1988	Ib	0,57	2 900	197	450	632
Keddara	1985	II	0,19	93	2 043	146	615
Bouroumi	1985	II	0,31	150	2 067	188	485
Guenitra	1984	II	0,43	202	2 129	125	233
B. Amrane	1987	Ib	0,66	3 700	178	16,5	20
Ouzert	1987	Ib	0,47	2 100	224	100	170
H. Debagh	1987	Ib	0,31	1 070	290	220	568
A. Zada	1986	Ib	0,47	2 080	226	125	213
S. Abdelli	1988	Ib	0,32	1 135	282	110	275

6 – CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans le cas des barrages algériens, la mise au point d'une méthodologie simple et pratique pour la quantification de la sédimentation est toujours un objectif attractif. Les mesures topo-bathymétriques sur les retenues de dix neuf barrages ont donc permis l'établissement d'une méthode de classification de l'échantillon étudié, l'identification des facteurs impliqués et la prédiction du taux d'abrasion. Si du point de vue temporel ces mesures ne sont pas synchrones, elles ont cependant l'avantage d'intégrer tous les types de sédiments (en suspension, charriés, érosion des berges, dépôts et reprises), et l'inconvénient de ne pas inclure la partie du transport solide déversée pendant les crues.

Le traitement de ces informations par différentes techniques a permis d'identifier trois catégories de barrages et leurs facteurs de classification : taux d'abrasion, superficie, coefficient d'écoulement et indice d'altitude. Le regroupement de classes est superposable au contexte géographique (zone côtière ou zone continentale).

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 locali-

sation soit en montagne soit sur les hauts plateaux. On peut imaginer l'usage d'un modèle basé sur les analyses factorielles discriminantes croisées pour hiérarchiser les phénomènes régissant l'alluvionnement. On pourrait ainsi expliciter les facteurs impliqués tels que : l'effet de continentalité et l'effet d'altitude (ABDELGADER *et al.*, 1995 et 1996).

Ce travail est une contribution à l'étude de la sédimentation des barrages situés en zone semi-aride. Il peut être encore enrichi en poursuivant les études suivantes :

– étude systématique des bassins versants de ces ouvrages par modélisation numérique de terrain (MNT) ,

– élaboration d'un fichier national 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.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDELGADER, A. (1994). *Essai de caractérisation des bassins versants dans la zone des Avant-Monts (Doubs).* Thèse Univ. de Franche-comté, Besançon, 194 p.

ABDELGADER, A., ACHOUR, F., MUDRY, J. (1995). Influence des événements hydroclimatiques et du caractère lithologique sur la minéralisation des eaux karstiques. Exemple : plateau de Besançon (Jura externe, France). *Compte Rendu Académie des Sciences* Paris, 321, série II a, p.129-135.

ABDELGADER, A., ACHOUR F., MUDRY J. (1996). Validation des écoulements par l'analyse discriminante. *Revue sci. de l'eau* n° 9(2), p. 219-230.

ADJEL, A., SMAIL, R. (1985). Étude de l'apport moyen interannuel des petits bassins versants de l'Algérie septentrionale. Mémoire fin d'études, Université d'Alger, 90 p.

BENBLIDIA, F. (1989). Étude de faisabilité de la retenue de oued Touila. Mémoire fin d'études, École Nat. Sup. d'Hydraulique, Blida, 120 p.

BINNIE and PARTNERS (1982). Schéma d'aménagement des ressources en eaux dans la région d'Alger Sébaou. Rapport n° b1, Alger, inédit.

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 Quebec méridional. *Journal of Hydrology n° 53, p. 95-116.*

BODY, K. (1989). Étude pluviométrique générale de l'Algérie. Rapport Agence Nationale des Ressources Hydraulique, Alger, 10 p.

CEMAGREF (1982). Apports solides annuels moyens des petits bassins versants. Note information technique, cahier 45 n° 6.

DEMMAK, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie. Thèse doct. Ing., Univ. Alger, 323 p.

DERI, J. (1977). Étude générale de la ressource en eaux en Algérie. Document Technique, Direction d'Etude et d'Aménagement des Ressources Hydrauliques, Alger.

DERI, J., HUSSON, A. (1976). Étude hydrologique pour un aménagement des bassins de Keddara et Hamiz. Rapport, Direction d'Etude et d'Aménagement des Ressources Hydrauliques, Alger, 96 p.

FOURNIER, F. (1960). Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et

les précipitations atmosphériques. PUF, Paris, 201 p.

GAZZOLO, T., BASSI, G. (1969). Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituants les bassins versants des cours d'eau italiens. Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique, n° 53.

HEUSCH, B. (1970). L'érosion du pré-rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du pré-rif occidental. Rapport Service des Recherches Forestières, Rabat, t.12, 175 p.

HUSSON, A. (1975). Coefficients de torrentialité et géomorphologie dynamique, leurs apports à l'étude des bassins versants. Rapport Direction d'Etude et d'Aménagement des Ressources Hydrauliques, n° 52/SHYL,18 p.

JOHNSON, G. (1983). Étude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride, envasement et dévasement des retenues en Algérie. Rapport PNUD – SOGREAH, Alger, 28 p.

KARAOUCHOV, A.V. (1977). Les débits solides, analyse et répartition géographiques. Hydrométeoizdat, Leningrad, 238 p.

KASSOUL, M. (1991). Contribution à l'étude de la sédimentation des barrages en Algérie. Mémoire fin d'études, École Nationale Supérieure de l'Hydraulique, Blida, 66 p.

LEBART, L., MORINEAU, A., FENELON, J.P. (1982). Traitement des données statistiques. Méthodes et programmes. Edit. Dunod, Paris, 510 p.

MARZOUKI, T. (1992). Diagnostic de l'envasement des grands barrages Marocains. *Revue Marocaine de Génie Civil* n° 38, p.46-53.

MUDRY, J. (1991). L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. *Revue sci. de l'eau* n° 4, p.19-37.

RAMDANE, M. (1989). La notion de représentativité dans les études de l'érosion. Application au bassin versant de L'Isser. *Revue Eaux et Sols d'Algérie*, n° 2, ANRH, p. 40-45.

RÉMÉNIÉRAS, G. (1986). L'hydrologie de l'ingénieur. Edit. Eyrolles, Paris, 456 p.

ROLET, P., SEGUIN, J.J. (1986 a). Traitement des données multivariables (application aux sciences de la terre). Approche théorique. Rapport BRGM 86 DT 005 ISA, 58 p.

ROLET, P., SEGUIN, J.J. (1986 b). Traitement des données multivariables (application aux sciences de la terre). Aspects pratiques. Rapport BRGM 86 DT 006 ISA, 62 p.

SOGREAH (1984). Étude du schéma directeur des ressources en eau du Chelif. Rapport technique, Grenoble et Montréal, 74 p.

SOGREAH, ANRH (1989). Étude méthodologique sur l'hydrologie des retenues collinaires et mise au point d'outils de calculs pratiques à l'usage des directions de l'hydraulique. Rapport technique n° 5, Grenoble, 156 p.

TIXERON, J. (1960). Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie. Rapport Secrét. d'État à l'Agriculture, Tunis, 31 p.

TOUAT, M. (1991). Bilan hydrologique des barrages algériens pour l'année 1988/1989. Rapport ANRH, 8 p.

TOUAT, S. (1989). Contrôle de la représentativité du TS. *Revue Eaux et Sols d'Algérie*, n° 2, ANRH.