

## Effets sur les transports solides des ouvrages hydrauliques en Afrique du Nord

J. Colombani

**Résumé.** Le risque de comblement des lacs artificiels est une des préoccupations majeures des constructeurs de barrage. Par ailleurs la présence même de ces retenues entraîne une modification certaine du régime des transports solides à l'aval pouvant par exemple conduire à des reprises d'érosion importantes dans certains cas.

Les retenues existantes constituent sans doute elles-mêmes le meilleur moyen actuel d'estimation des risques de sédimentation: l'exemple des mesures faites au barrage du Mellègue et sur quelques autres en Tunisie est donné. Enfin il est utile de mentionner les effets possibles des aménagements sur les plaines d'inondation et sur l'environnement marin.

Le climat de la zone semi-aride d'Afrique du Nord met particulièrement en relief l'importance de ces phénomènes du fait de son irrégularité inter-annuelle et de l'intensité des actions érosives.

### The effects of hydraulic constructions on solid transport in North Africa

**Abstract.** The silting up of artificial lakes is one of the most important problems of dam engineers. By their very presence dams unquestionably modify the solid transport regime downstream, in some cases causing a resumption of erosion. Existing artificial lakes are without doubt the best means of estimating the hazards of sedimentation. Measurements from the Nebeur Reservoir on the Mellègue River are given as an example. Lastly the possible effects of hydraulic constructions on flood plains and on the marine environment are mentioned. These phenomena are particularly emphasized in North Africa because of the irregular nature of its semiarid climate and the intensity of erosive forces.

## INTRODUCTION

Il est courant de définir la dégradation spécifique moyenne  $e_m$  d'un bassin versant en effectuant le quotient  $e_m = E/S$ ,  $E$  étant le transport solide de l'exutoire et  $S$  la superficie du bassin versant. Cette façon de faire est un peu sommaire et ne devrait être appliquée qu'à des fractions petites  $ds$  de la superficie du bassin. A chaque fraction  $ds$  on peut associer une dégradation spécifique  $e$  variable avec l'emplacement de  $ds$  et pouvant prendre des valeurs positives ou négatives, ce qui signifie qu'en certains points les apports peuvent dépasser l'érosion.  $e$  peut d'ailleurs être successivement positif et négatif en un même point en fonction du temps, par exemple dans le lit d'un oued qui sert de lieu de stockage provisoire et de triage, les parties les plus grossières du transport solide ayant une progression discontinue et les plus fines une progression quasi continue (au moins dans le lit mineur). On sait seulement a priori que:

$$e_m = \frac{1}{ST} \int_S \int_0^T edsdt \quad (1)$$

$e_m$  érosion spécifique moyenne,  $S$  superficie du bassin versant,  $T$  durée conventionnelle (par exemple 1 an).

La construction d'ouvrages hydrauliques modifie localement la valeur de  $e$  et perturbe donc le régime naturel des phénomènes d'érosion, transport solide et sédimentation.

De façon générale on doit distinguer les phénomènes qui se produisent en dehors du réseau de drainage et ceux qui ont lieu dans le réseau de drainage. C'est ainsi que l'érosion sur les versants par les écoulements en nappe et les ruissellements de surface sont par nature très différents de l'érosion que l'on constate dans le lit des cours d'eau, érosion qui peut être qualifiée de 'linéaire' par opposition avec l'érosion 'de surface' des versants. De même les transports solides et la sédimentation se font de façon très différente hors du réseau de drainage et dans le réseau.

## EFFETS PREVISIBLES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Il est bon de citer pour mémoire les travaux de défense contre l'érosion (banquettes, reforestation, etc . . . ) qui ont une action importante sur l'érosion des versants, pas toujours bénéfique d'ailleurs.

Nous nous intéresserons davantage aux ouvrages construits dans le réseau de drainage, c'est-à-dire essentiellement les barrages, les digues et les dérivations.

### Les barrages

La construction d'un barrage sur un cours d'eau entraîne la constitution d'un lac de retenue, plus ou moins important et une régularisation des débits sur une période plus ou moins longue. On observe sur les transports solides trois sortes d'effets différents.

(1) L'érosion spécifique locale  $e$  de la formule (1), devient négative dans la retenue. Autrement dit au lieu d'avoir érosion on a sédimentation. Cette sédimentation est d'ailleurs sélective. Alors que les transports de fond par charriage et saltation, concernant surtout les éléments grossiers sont pratiquement stoppés et piégés dans la retenue dès l'entrée dans celle-ci ou à faible distance, les transports en suspension sont d'autant plus longs à se déposer qu'il s'agit d'éléments fins. Une fraction importante de ces sédiments fins est exportée hors de la retenue soit au cours des déversements en période de crue soit au cours des dévasements pratiqués pour maintenir le libre jeu des vannes du barrage.

Le premier effet est donc une réduction sélective du transport solide, les éléments transportés étant d'autant mieux piégés qu'ils sont plus grossiers.

La proportion d'éléments fins définitivement déposés dans la retenue dépend du mode d'exploitation de cette retenue et de son volume.

(2) A l'aval du barrage l'eau restituée par la retenue est relativement peu chargée et se trouve donc loin de sa capacité maximum de transport. Le résultat est que, à débit égal, cette eau a un pouvoir érosif plus important que celle du cours d'eau non perturbé par le barrage. On pourra donc assister à une reprise énergique de l'érosion à l'aval du barrage, sur une distance plus ou moins grande.

(3) La régularisation des débits va entraîner une diminution importante des débits de pointes à l'aval du barrage, surtout si la retenue est importante. En particulier nombre de crues moyennement importantes vont être retenues. L'effet produit sera inverse de l'effet précédent et l'érosion à l'aval doit se trouver réduite. Cependant pour les crues les plus fortes l'effet régulateur risque de ne plus jouer aussi bien et on assistera alors à une forte érosion. Il est donc possible que la répartition statistique des effets érosifs à l'aval du barrage soit encore plus dissymétrique que pour la rivière en son état naturel.

En Tunisie nous avons pu faire des mesures sur le réservoir du barrage de Nebeur sur le Mellègue. L'objet de ces mesures était de déterminer le volume des sédiments déposés dans la retenue de 300 millions de mètres cubes de ce barrage. Des mesures ont également été faites sur des barrages de moindre importance. Une communication de

TABLEAU 1. Part des sédiments transportés piégés dans les retenues de barrages

Oued	$S$ [km <sup>2</sup> ]	$T$ [ans]	$P$ [%]	$R$	$e_m$ [t/km <sup>2</sup> × an]
Mellègue	10 300	21.33	37.6	1.43	695
Nebaana	855	10	79	2.1	2300
Bezirk	80	14.75	69.4	1.5	2430
Chiba	64	12	98	2.1	4220
Masri	40	7.5	86.8	2.4	6050
Lakhmess	131	9.33	68.8	1.9	2864
Kasseb	101	7.5	93.8	1.4	5070

$S$  superficie du bassin à l'amont du barrage.

$T$  durée totale des dépôts considérés.

$P$  part retenue des sédiments transportés en % du total de la période.

$R$  rapport du volume utile de la retenue au volume moyen annuel liquide apporté à la retenue.

$e_m$  érosion spécifique moyenne du bassin à l'amont.

Messieurs Claude et Ghorbel exposent en détail les résultats obtenus par ces mesures. Nous les avons utilisés pour évaluer la part des transports solides venant de l'amont retenue par les barrages. Le Tableau 1 récapitule ces résultats.

On constate que le pourcentage des sédiments déposés dans les retenues est très fort en général: même pour le Mellègue dont la retenue a un volume utile pas très élevé par rapport au volume de l'apport liquide moyen annuel (1.43) et très faible par rapport aux apports exceptionnels (0.34 en 1969) les sédiments piégés dans la retenue en 21 ans représenteraient près de 38 pour cent du total des apports. Pour les six autres barrages étudiés les pourcentages ne descendent guère au-dessous de 70 pour cent et atteignent près de 100 pour cent (Chiba 98 pour cent). On voit donc l'énorme influence d'un barrage de retenue sur le régime des transports solides.

Il ne nous a pas été possible malheureusement de mettre clairement en évidence par des mesures à l'aval des barrages la modification due à une compétence plus élevée des eaux déversées. Mais il n'y a aucun doute que par suite du triage fait dans la retenue seul les parties les plus fines sont évacuées par les lâchures du barrage. La retenue s'étend sur 21 km de longueur et il est déjà visible sans mesure que la taille des sédiments déposés décroît d'amont en aval de la retenue. Prochainement une campagne systématique de prélèvements doit nous donner la variation de la taille des sédiments. Nous disposons déjà de quelques résultats rappelés dans le Tableau 2 (prélèvements obtenus par un plongeur).

On constate qu'à 5 km du barrage (P17) les sables grossiers (200–2000  $\mu$ ) ont pratiquement disparu (1 pour cent), argiles et limons (<50  $\mu$ ) représentent déjà 88 pour cent du total, les sables fins (50–200  $\mu$ ) ne représentant plus que 10 pour cent. A 3 km du barrage (P13) il n'y a presque plus de sables (>50  $\mu$ ), 48 pour cent d'argiles (<2  $\mu$ ), 42 pour cent de limons fins (2–20  $\mu$ ).

A 1.9 km du barrage (P9) les proportions d'éléments fins augmentent encore 93 pour cent des éléments étant plus petits que 20  $\mu$ . Hjulström en 1935 a publié un graphique où apparaissent le rapport liant le diamètre des grains transportés et la vitesse de l'eau les véhiculant, le rapport entre le diamètre des grains et la vitesse de l'eau les arrachant au fond. Bien qu'il ne tienne pas compte de la température de l'eau et qu'il résulte de données statistiques ce graphique reproduit ci-après (Fig. 1) est assez significatif.

On constate en particulier que pour un diamètre de l'ordre 15 à 20  $\mu$  une vitesse inférieure à 0.1 cm/s ne permet pas le maintien en mouvement des grains. Les sables grossiers (200 à 2000  $\mu$ ) retombent au fond pour des vitesses de 1 à 10 cm/s: il n'est donc pas étonnant de ne plus guère en trouver dans les sédiments du Mellègue à 15 km de la tête de la retenue. On doit admettre que seuls les éléments fins sont évacués lors

TABLEAU 2. Granulométrie des dépôts dans la retenue du Mellègue à Nebeur

Site	Distance du barrage [km]	Profondeur	Répartition granulométrique [%]					
			<2	2–20 $\mu$	20–50 $\mu$	50–200 $\mu$	200–2000 $\mu$	>2 mm
P33	12	Berge RD						
		0–20 cm	22	15	17	42	1	
		40–60 cm	19	17	20	42	1	
50 m amont P33	12.05	Berge RD						
		0–20 cm	10	12	15	53	7	
		40–55 cm	1	0.5	1	11	86	
Délaissé de crue P33	12	Berge RD						
		0–20 cm	15	16	20	45	2	
		40–55 cm	3	3	4	79	10	
P17 sous l'eau (13.2 m)	4.9	0.20 cm	24	44	20	10	1	
P13 sous l'eau (17.9 m)	3.1	0–20 cm	48	42	7	2	1	
P9 sous l'eau (18.9 m)	1.9	0–20 cm	49	44	5	1	1	

Nota: Les berges du profil 33 où ont été faits des prélèvements sont inondables par la retenue.

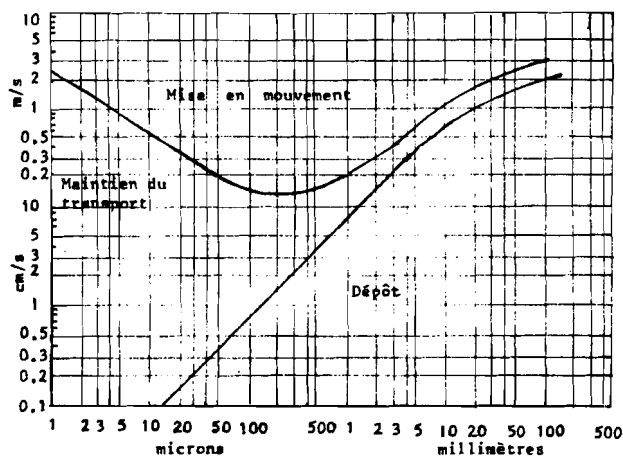


FIGURE 1. Rapports entre le diamètre des grains, la vitesse de l'eau et l'état des grains (transport, érosion, dépôt).

des lâches du barrage. On peut évaluer les conséquences de la construction prévue du barrage de Sidi Salem sur la Medjerdah quant aux débits solides. Il n'est pas déraisonnable de penser que la proportion des éléments piégés dans la retenue de ce futur barrage sera du même ordre que pour le barrage de Nebeur soit environ 38 pour cent. D'après la *Monographie de la Medjerdah* (Colombani *et al.*, 1974) le transport solide en aval de Bou Salem est évalué à  $17.5 \times 10^6$  tonnes en année moyenne dont  $6.7 \times 10^6$  tonnes resteraient ainsi piégées dans la retenue. Pour un débit liquide annuel centenaire le transport est évalué à  $58.6 \times 10^6$  tonnes dont  $22.3 \times 10^6$  tonnes resteraient piégés. L'influence d'un tel prélèvement sur les transports solides devrait être très grande. En effet à l'aval du site du futur barrage de Sidi Salem la pente du fleuve est assez élevée (0.8 m/km). L'écoulement d'une eau peu chargée devrait entraîner une érosion accrue et l'évacuation des

sédiments apportés par les affluents, surtout la Siliana, être facilitée. Encore plus en aval les apports de sédiments dans les plaines d'inondation devraient être réduits de façon très sensible. Enfin à l'exutoire en mer il est probable que l'on constatera des effets importants: érosion de la côte par la mer, translation plus faible des sédiments le long de la côte (ceci peut-être bénéfique pour le port de la Goulette en évitant un comblement difficile à combattre), diminution des apports nutritifs pour le plancton (ceci peut avoir un effet négatif sur la production de poisson de la région). Des effets semblables ont été constatés depuis la construction du barrage d'Assouan sur le Nil.

Le futur barrage sur le Zéroud à Sidi Saad bien que fonctionnant à pertuis ouvert, provoquera lui aussi le dépôt d'une part importante du débit solide du fleuve qui peut charrier des quantités énormes de sables et limons. Des estimations récentes (SEREQ, 1973; Kallel *et al.*, 1975) donnent pour les débits solides du Zéroud à Sidi Saad des valeurs variant de 6 à 9 millions de tonnes en année 'moyenne', de 170 à 200 millions de tonnes pour une crue centenaire et de 550 à 660 millions de tonnes pour une crue millénaire. On peut estimer que le barrage retiendra au moins 40 pour cent de ces débits solides soit 2.4 à 3.6 millions de tonnes en année moyenne (2 à 3 millions de  $m^3$ ), 68 à 80 millions de tonnes pour une crue centenaire (57 à 67 millions de  $m^3$ ) et 220 à 264 millions de tonnes pour une crue millénaire (183 à 220 millions de  $m^3$ ). Bien que ces estimations soient encore grossières du fait des difficultés de mesure des débits solides, l'ordre de grandeur des valeurs estimées est correct. S'agissant d'un fleuve au régime très irrégulier (la répartition statistique des débits de crue est extrêmement dissymétrique) les effets prévisibles sont importants tant en ce qui concerne le comblement de la retenue que la sédimentation à l'aval dans la plaine de Kairouan.

### Ponts, barrages au fil de l'eau, digues

Ces ouvrages, de moindre importance que les barrages de retenue, ont cependant une influence non négligeable, Claude *et al.* (1976), dans une étude récente, ont montré l'effet perturbateur de certains ouvrages anciens comme par exemple le barrage d'El Bathan: surcreusement à l'aval, dépôt de sables grossiers à l'amont sont les effets les plus apparents. Mais une analyse fine montre aussi que la granulométrie des dépôts est, à proximité des obstacles, d'autant plus grossière que la forme de l'obstacle a plus perturbé l'écoulement. C'est le cas au voisinage du barrage d'El Bathan mais aussi de la cascade de l'émissaire, des méandres de Cherfech, du pont de Medjez el Bab, du débouché du défilé de Sidi Salem, du pont de Protville. La même étude montre qu'une fraction importante des dépôts grossiers au voisinage des obstacles sont composés de particules calcaires (débris coquilliers ou nodules).

L'endiguement du cours de la Medjerdah dans la basse vallée a conduit à un dépôt important de sédiments dans le lit majeur délimité par des digues, au point que parfois la capacité de débit entre les digues puisse devenir insuffisante. En 1973 au cours de la crue du mois de mars on a constaté aussi un exhaussement important de l'ancien lit de la Medjerdah par dépôt d'alluvions ce qui a pour conséquence que les débits d'étiage ne peuvent plus emprunter cet ancien lit. Corrélativement l'émissaire artificiel de la Medjerdah s'est creusé assez fortement, encore loin de son profil d'équilibre.

### CONCLUSION

Tous les exemples ci-dessus n'ont été cités que pour montrer combien il convient d'être prudent lorsqu'on décide la construction d'un quelconque ouvrage destiné à maîtriser un cours d'eau ou tout au moins à en modifier le comportement. Bien souvent les conséquences les plus importantes échappent aux promoteurs des ouvrages, soit qu'il s'agisse de conséquences réellement imprévisibles dues à des conditions locales très particulières, soit qu'il s'agisse de conséquences à long terme, ou encore à faible probabilité d'apparition. Ceci est particulièrement sensible en Afrique du Nord et de façon

générale en climat aride (nord est du Brésil par exemple) lorsque la dissymétrie des répartitions statistiques des événements pluvieux devient un phénomène primordial. C'est ainsi que sur le Zéroud les effets d'une crue millénaire, qu'on a une chance sur cent de voir apparaître dans les 10 prochaines années, sont sans commune mesure avec les effets d'une crue 'moyenne': les transports solides dans le 1<sup>er</sup> cas peuvent dépasser 100 fois les transports solides de la crue 'moyenne'.

Nous insistons très vivement sur la prudence avec laquelle il convient d'entreprendre des ouvrages modifiant sensiblement le régime naturel des cours d'eau.

#### REFERENCES

- Claude, J., Francillon, G. et Loyer, J. Y. (1976) *Les alluvions déposées par l'Oued Medjerdah lors des crues exceptionnelles de mars 1973*: DRES-ORSTOM, Tunisie, ronéo.
- Colombani, J., Kallel, M. R. et al. (1974) *Monographie de la Madjerdah*: DRE-ORSTOM, décembre.
- Hjulström, 1935, cité dans *Les Agents de la Morphogénese - 1. Les eaux courantes* par A. Jauzein: Ecole Normale Supérieure, 1971.
- Kallel, M. R., Claude, J. et al. (1975) *Etude hydrologique préliminaire des Oueds Zeroud et Merguellil*: DRE-ORSTOM, juin.
- SEREQ (1973) *Projet Canadien - Programme de Kairouan crues des Oueds Zeroud et Merguellil*, juillet.