

# **SÉDIMENTATION ET BARRAGES**

## ***Implications géomorphologiques, économiques et environnementales du comblement des réservoirs. Relation avec les extractions de matériaux fluviaux***

***Jonathan B. Laronne***

Le comblement des réservoirs est une question complexe qui nécessite en premier lieu de connaître les taux de remplissage et les caractéristiques des sédiments accumulés. Cet enregistrement permet d'ailleurs de déterminer les taux d'érosion liés aux diverses crues successives et d'en inférer les causes, telles que l'utilisation des terres. Ces connaissances permettent de considérer les moyens d'accroître la durée de vie des réservoirs. La deuxième partie de l'exposé traite de l'extraction des sables et graviers dans les lits des cours d'eau. A priori sans relation apparente, la compréhension des avantages et des inconvénients de l'utilisation de ces agrégats sert en fait à illustrer la manière de concilier développement économique et conservation de l'environnement. Enfin, nous essaierons de lier le comblement des réservoirs et l'extraction sédimentaire en rivière de manière bénéfique pour l'environnement.

### **LE COMBLEMENT DES RÉSERVOIRS**

#### **Taux de sédimentation**

L'apport sédimentaire net depuis le bassin fluvial est particulièrement élevé dans les régions semi-arides en raison principalement de la faible protection végétale et dans les secteurs

Jonathan B. Laronne  
Université Ben Gourion  
Beer Sheva, Israël

---

*Le transport total de particules fines suspendues et grossières charriées représente plusieurs centaines de tonnes par km<sup>2</sup> et par an dans des conditions de semi-aridité ou de pentes fortes*

de haut relief comme les régions alpines. Ces deux types de milieux sont donc aussi susceptibles de voir leurs réservoirs se combler rapidement. Le transport total de particules fines suspendues et grossières charriées représente plusieurs centaines de tonnes par km<sup>2</sup> et par an dans des conditions de semi-aridité ou de pentes fortes. Il est plus réduit, d'un ordre de grandeur, dans des régions tempérées comme celles existant le plus souvent en France. Les Alpes et le désert septentrional d'Israël partagent le problème de la courte durée de vie de réservoirs créés pour des besoins énergétiques ou pour l'alimentation en eau, durée réduite au mieux à quelques décennies dans le cas d'Israël. Dans les deux cas, la diminution du transfert sédimentaire à l'aval des barrages occasionne une multitude de problèmes d'environnement et de génie. Ainsi, dans les Alpes, il en résulte une importante dégradation des cours d'eau de grande et moyenne tailles à l'aval des ouvrages. Les publications concernant le comblement traitent soit de relations empiriques propres à des sites particuliers, soit de modèles théoriques souvent inadaptés à une région particulière (Albertson et al., 1996). Cet exposé se concentrera sur des cas documentés par des mesures et des observations de terrain (Reid et al., 1998).

### **Stratigraphie et caractéristiques des sédiments accumulés**

A l'entrée d'un réservoir, la réduction de la pente superficielle de l'eau et de la vitesse entraîne l'abandon des fractions les plus dimensionnées de la charge de fond. La sédimentation y est donc plus grossière alors qu'elle s'affine vers le centre et vers les parties les plus profondes, en particulier à proximité du barrage. Cependant l'essentiel de l'apport sédimentaire est redevable aux crues. Les forts débits entrant à l'amont du réservoir créent un courant-jet plus rapide au centre. La charge de fond continue alors à être transportée, parfois très loin, dans le lac. Le gradient latéral de vitesse étant très abrupt, ce transport se limite à une zone étroite et allongée. A la décrue, ce courant se contracte et la circulation se réduit dans le réservoir. A ce stade, le dépôt se fait en masse par chute des particules précédemment maintenues en suspension. A l'issue d'un certain délai, dépendant de conditions telles que la profondeur du lac ou l'agitation liée aux vents, les particules les plus fines se déposent à leur tour. Il est à noter que certains sédiments fins s'accumulent dès leur entrée dans le réservoir.

En résumé, les dépôts des réservoirs sont grossiers, en général sableux et parfois graveleux, à l'entrée et s'affinent vers l'aval pour

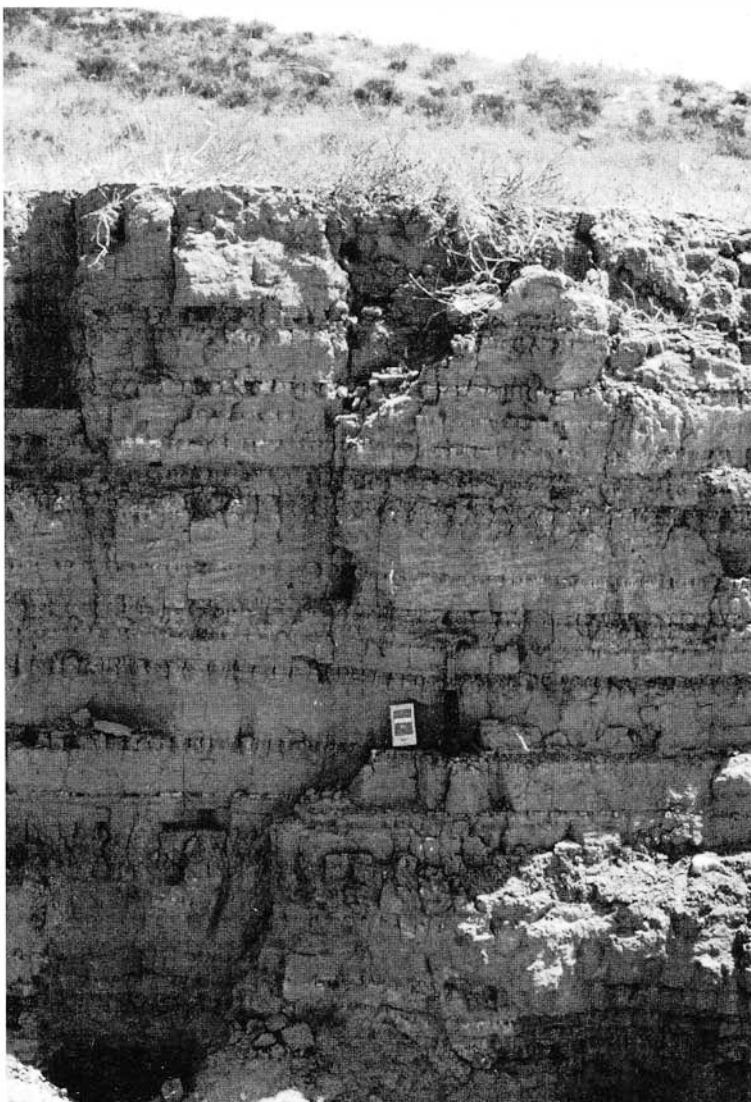
---

*L'essentiel de l'apport sédimentaire est redevable aux crues*

devenir souvent limoneux et parfois entièrement argileux (<10µm). Même dans un seul secteur du lac, les sédiments ne sont ni homogènes, ni isotropiques puisqu'ils sont le résultat d'apports de crues. Chacune d'elles laisse une signature qui comporte une couche basale plus grossière surmontée de lits de limon et d'argile (Laronne, 1987 ; 1999). Cette stratification demeure souvent intacte (figure 1).

---

*les dépôts des réservoirs sont grossiers, en général sableux et parfois graveleux, à l'entrée et s'affinent vers l'aval pour devenir souvent limoneux et parfois entièrement argileux*



*Figure 1: Dépôts de réservoir montrant le litage typique de sédiments plus grossiers surmontés de limon et d'argile consécutif à chaque crue – Réservoir de Yatir, Israël.*

## Les enseignements des sédiments lacustres

Les réservoirs constituent d'excellentes trappes à sédiments même si leur efficacité n'atteint pas nécessairement 100 %. Leurs dépôts sont donc des mémoires de l'évolution érosive du bassin versant à partir de leur mise en eau. Ainsi le volume entier accumulé est l'équivalent de l'apport total des charges fluviales et peut être approximativement relié aux taux moyens d'érosion des sols (bien que ceux-ci varient énormément dans l'espace). Cette méthode a été souvent utilisée pour établir des taux globaux d'érosion historique. Mais il est également possible d'utiliser les séquences sédimentaires pour reconstituer les variations historiques de ces apports (Laronne, 1989) et tout particulièrement l'évolution temporelle de leur amplitude et de leur fréquence (figure 2).

---

*Il est possible d'utiliser les séquences sédimentaires pour reconstituer les variations historiques de ces apports*

A titre d'exemple des enseignements qui peuvent ainsi être tirés de ces enregistrements, considérons les changements d'utilisation des terres qui se sont succédés dans le Néguev septentrional semi-aride (Israël). Depuis l'indépendance de cet Etat en 1948 et localement auparavant, on a appliqué des techniques de protection des sols telles que labours adaptés et diminution des pâturages.

L'analyse séparée des enregistrements pluviométriques et des séquences sédimentaires du réservoir de Ruhama permet de distinguer 3 périodes (avec deux approches différentes pour la troisième, dénotées 3a et 3b). Les entrées sont normalisées par rapport aux cumuls de précipitations au-dessus d'un seuil de valeur quotidienne. On remarque la diminution de l'efficacité des pluies sur les apports sédimentaires et donc de l'érosion des sols lors de la période 3. Ces apports sont cumulés en partant des plus importants de la période considérée. A l'exception de l'événement le plus fort de la période 2, tous les autres sont inférieurs à ceux de la première. Ceci montre la décroissance non seulement de l'érosion des sols en moyenne, mais aussi de celle liée aux précipitations abondantes.

## Valorisation industrielle des réservoirs

On a considéré longtemps qu'il n'était pas rentable de draguer et de transporter ailleurs les sédiments comblant les réservoirs, le prix de ces opérations dépassant celui tiré d'une prolongation de l'utilisation de l'eau retenue. Tout usage industriel de ces dépôts augmenterait donc la durée de vie des ouvrages. Malgré l'hétérogénéité des sédiments précédemment vue, il est possible de trouver des secteurs homogènes dans les plus abondantes

accumulations. C'est dans de tels secteurs que l'Institut de Recherches Appliquées de l'Université Ben Gourion a prélevé et analysé de nombreux échantillons. Il en ressort que certains réservoirs sont tout à fait propices à une utilisation industrielle.

Les réservoirs dont les deltas d'amont incluent des dépôts grossiers importants sont des sources d'extraction de matériaux de construction de routes et d'édifices. L'essentiel de la sédimentation est cependant fin. De petits volumes peuvent se révéler localement avoir les qualités requises pour la poterie, mais l'utilisation la plus importante est plutôt l'étanchéité de bassins d'épandage ou d'étangs, y compris piscicoles. L'industrie de la brique peut sans aucun doute y trouver des matériaux adéquats surtout en les mélangeant avec d'autres argiles.

Certains réservoirs sont tout à fait propices à une utilisation industrielle : matériaux de construction, étanchéité de bassin, briques...

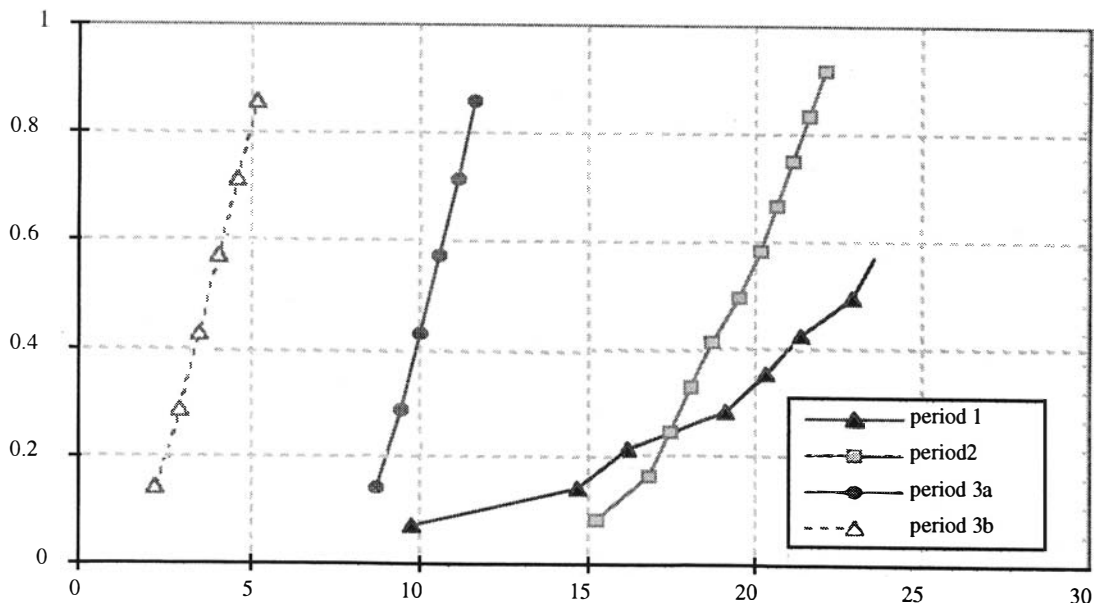


Figure 2. Distribution des apports sédimentaires dans le réservoir de Ruhama pendant 3 périodes d'utilisation différente des terres. Apport sédimentaire cumulé en tonnes par mm de pluie et par km<sup>2</sup> (abscisse), probabilité de dépassement (ordonnée).

1.a	N° du mélange	Masse de l'argile à sec gramme			Volume d'eau ajouté cm <sup>3</sup>
		Shiqma	Adorayim	Chocolat	
	1	750	-	250	175
	2	500	-	500	200
	5	500	500	-	500
	8	640	-	360	140

1.b	N° du mélange	Force de liaison kg/cm <sup>2</sup>		Retrait %		Adsorption d'eau	
		Séchage à 105° C	Calcination à 950° C	Séchage à 105° C	Calcination à 950° C	%	
	1	69.5	90	9.0	11	15.2	
	2	18.0	190	9.0	11	13.1	
	5	59.0	140	8.6	9	10.7	
	8	142.1	131	8.2	11	12.0	

Tableau 1 : Mélanges d'argiles de réservoirs sélectionnées et d'argile standard de l'industrie, "Chocolat" (1.a). Propriétés physiques de barreaux éprouvettes préparés avec ces mélanges (1.b).

	Concentration en solution aqueuse (%)	Argile (réservoir de Shiqma)	Argile "Kedma"
Constituant			
		< 0,02	
		0,1	
		0,18	
		1,0	
		34,8	41,5
		9,9	10,4
		5,4	5,0
		2,65	
		15,5	9,2
	Perte au feu	29,3	20,6
		9,3	
		14,0	

Tableau 2 : Analyses chimiques des argiles du réservoir de Shiqma et des argiles locales "Kedma" utilisées dans l'industrie des ciments.

Le tableau 1b montre que les argiles des réservoirs de Shiqma et d'Adorayim sont excellentement appropriées dans certaines proportions (les mélanges 2, 5 et 8 satisfont largement les normes de cette industrie). Une briqueterie fabrique déjà ses produits à partir de ces matériaux : l'accroissement de la durée de vie des réservoirs ne coûte donc rien à la collectivité.

En terme de volume, l'adéquation des argiles de réservoir est supérieure dans le cas de l'industrie des ciments. Le tableau 2 montre que la composition chimique de l'argile contenue dans le réservoir de Shiqma inclut de basses teneurs en chlorures et sulfates et de fortes teneurs en silice et alumine ainsi que des teneurs en oxydes de fer proches de celles rencontrées dans l'argile " Kedma ", en général utilisée localement. Durant l'été 1998, alors que le réservoir était à sec, il a été utilisé comme une carrière industrielle livrant 20 à 25 000 m<sup>3</sup> d'argile par jour.

---

*L'adéquation des argiles de réservoir est supérieure dans le cas de l'industrie des ciments*

## **EXTRACTION DES GRAVIERS FLUVIATILES**

### **Les alluvions fluviales, des agrégats recherchés**

Au contraire de l'extraction des limons et argiles, possible en tout lieu des réservoirs à l'exception des deltas d'amont, les sédiments fluviatiles constituent des sources de sables et de graviers particulièrement appréciées comme agrégats, ceci pour plusieurs raisons :

1. Economie énergétique puisque ce matériel est déjà granulaire, n'est généralement pas cimenté et ne requiert pas d'excavation profonde.

2. Les matériaux sont mécaniquement résistants puisqu'ils ont subi une importante abrasion physique qui les a débarrassés des composants les plus tendres, emportés en suspension.

3. Les matériaux sont chimiquement résistants puisque l'altération *in situ* a permis l'exportation en solution des composants les plus sensibles.

4. Les particules sont émoussées et constituent un matériel idéal pour la constitution d'allées de granulats et l'industrie des ciments.

5. Les alluvions sont souvent géographiquement proches des sites d'utilisation en raison de leur distribution linéaire dans les vallées.

6. Les alluvions ne contiennent en général que peu de matériaux dérivés (10 à 25 %), surtout des fines.

## Impacts paysagers, géotechniques et environnementaux de l'extraction

---

*Malgré l'intérêt économique et technique de l'extraction en rivière, ses multiples effets sont tels que cette activité devrait être interdite à certains endroits*

Malgré l'intérêt économique et technique de l'extraction en rivière, ses multiples effets sont tels que cette activité devrait être entièrement interdite à certains endroits. Un très grand nombre de rapports soulignent l'ampleur de ces conséquences (par exemple Kondolf, 1995).

Ces effets comportent : (a) le déclenchement de l'érosion régressive sur les cours d'eau, (b) la destruction des pavages de lit, (c) l'instabilité des pentes et (d) la diminution de la fourniture de sédiments à l'aval. Il en résulte l'affouillement des piles de pont, la destruction des routes, le ravinement et le morcellement des terres cultivées. L'érosion résultante des sols arables entraîne l'accumulation de fortes charges sédimentaires en aval, notamment dans les réservoirs et les lacs.

Les effets paysagers incluent la formation : (a) de tas de matériaux accessoires (fines), (b) de pentes latérales fortes ainsi que (c) la modification en plan des lits fluviaux. Ces accumulations constituent une atteinte visuelle au paysage conjointement avec les excavations voisines. Parfois placées dans les petites vallées affluentes, prétendument pour ne pas affecter la vallée principale, elles en dégradent complètement l'aspect. Leurs pentes sont localement affectées de ravinements et de glissements qui accentuent encore les problèmes de sédimentation. Les pentes fortes des excavations, autre atteinte esthétique, occasionnent souvent la formation de ravines et constituent parfois un danger. Les rivières à méandres ainsi exploitées évoluent souvent vers le tressage, entraînant une instabilité latérale et l'élargissement du lit. L'apparition d'îles et de bancs modifie les conditions écologiques et affecte l'agrément esthétique originel.

Les effets environnementaux cumulent (a) la destruction complète de la flore et de la faune aquatique, (b) la dégradation des habitats d'aval en raison de l'abaissement du débit de base ou de l'augmentation des concentrations en fines et (c) la transformation de l'aquifère alluvial proche de la surface. Les modifications écologiques sont variables mais on doit remarquer que le lit tend à être recolonisé par de nombreux habitats en raison du renouvellement hydrique et sédimentaire. Les effets à court terme incluent la prolifération des moustiques dans les trous d'eau stagnante. Ces derniers sont souvent en contact avec l'aquifère de surface dont la qualité peut ainsi se dégrader. En régions semi-arides et arides, l'extraction au niveau de la nappe a pour conséquence l'accroissement de l'évaporation d'une eau terriblement nécessaire.

---

*En régions semi-arides et arides, l'extraction au niveau de la nappe a pour conséquence l'accroissement de l'évaporation d'une eau terriblement nécessaire*



## Méthodes destinées à diminuer les impacts

Face à la multiplicité des effets pervers, divers moyens techniques et procédures de planification se sont développés pour les atténuer. Ils concernent (a) les méthodes d'extraction, (b) leur localisation, (c) leurs abords, (d) l'utilisation d'autres sources et matériaux, (e) la réhabilitation des sites, (f) le renforcement des dispositions réglementaires et de la surveillance et (g) la création de fonds à cet effet.

La *méthodologie extractive* implique le décapage complet d'une tranche plutôt que la création d'îlots de matériaux inutilisés, le rétablissement de pentes minimales pour le lit et les berges, l'absence d'accumulations artificielles dans le lit actif, leur réduction sur les parties hautes en utilisant les sédiments fins comme remblais ailleurs ou en les restituant au lit fluvial. Il s'y ajoute l'interdiction d'utilisation comme décharge, l'établissement d'une topographie qui autorise un écoulement naturel plus profond dans un chenal bien défini s'inscrivant entre des rives largement ouvertes de manière à rétablir la plaine d'inondation, le décapage jusqu'à un niveau qui ne perturbe ni l'habitat piscicole, ni la nappe phréatique, et la conservation du sol superficiel jusqu'à son retour sur l'espace réhabilité.

La *localisation des carrières* doit être planifiée de façon à éviter la proximité immédiate des routes, ponts et autres structures traversant le cours d'eau ainsi que celle des sites archéologiques et autres lieux remarquables, en particulier sur les plans paysagers et écologiques. Les abords des carrières doivent être aménagés en prenant conscience des diverses nuisances (poussière, bruit, érosion, dégradation paysagère) pour lesquelles un niveau minimal doit être légalement imposé par le permis d'exploitation.

On doit aussi prendre en considération la possibilité d'utiliser des sources de matériaux sur les versants si elles apparaissent moins fragiles. D'autres dépôts peuvent servir d'agrégats, comme les anciens remblais routiers, les digues et berges abandonnées ou encore les décombres.

Le lancement de programmes de réhabilitation des carrières demande de l'imagination. La durée du retour naturel aux conditions initiales dépasse le cadre de plusieurs décennies même si le cours d'eau peut apporter ses alluvions, ce qui est exclu dans le cas de niveaux plus élevés comme les terrasses et les versants. Des projets de sites touristiques et sportifs ou encore de traitement des déchets peuvent être envisagés selon les caractéristiques locales. La réussite des plans de réhabilitation dépend évidemment de la mise en application de limitations légales aux trois stades de la demande de permis d'exploitation, des travaux et de leur achèvement. Un autre

---

*Le lancement de programmes de réhabilitation des carrières demande de l'imagination*

moyen d'assurer le succès est la constitution d'un fonds régional ou national, ce qui n'est pas appliqué dans tous les pays. Ce fonds est alimenté par une taxe sur les exploitations extractives. Il sert à la réhabilitation des carrières anciennes, à la fixation des caractéristiques des nouvelles exploitations (type, quantité et localisation) et au financement des recherches sur les effets de ces activités.

## DÉVELOPPEMENT ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les réservoirs sont indispensables au développement régional quelles qu'en soient les utilisations – énergie, alimentation, protection contre les crues. Il en est de même pour les agrégats aux multiples usages – construction, cimenterie, routes, chemins, parkings, aérodromes, digues et autres remblais. Mais d'autres besoins, aussi importants, existent dans les domaines de la qualité de vie et de l'environnement. Ils incluent la défense et la conservation des habitats floristiques et fauniques, l'entretien des paysages fluviaux, notamment de la morphologie naturelle des cours d'eau principaux et affluents, la protection des sols et la préservation des ressources naturelles. Ainsi, en cas de besoin d'agrégats grossiers, il est avisé d'examiner

---

*En cas de besoin d'agrégats grossiers, il est avisé d'examiner les possibilités de fourniture par le delta d'un réservoir voisin, ce qui permet en même temps d'accroître la capacité du réservoir et sa durée de vie et de diminuer les effets environnementaux qu'entraînerait une exploitation en un autre lieu*

*Figure 3 : Vue latérale du réservoir de Besor. Préparé par A. Natif et réalisé par le Service de Développement Territorial et la Compagnie d'Alimentation en Eau Mekorot, il constitue un exemple de la prise en compte des problèmes de l'extraction en rivière et du comblement des réservoirs : développement et conservation deviennent compatibles.*



les possibilités de fourniture par le delta d'un réservoir voisin, ce qui permet en même temps d'accroître la capacité du réservoir et sa durée de vie et de diminuer les effets environnementaux qu'entraînerait une exploitation en un autre lieu. Un exemple d'occasion manquée de concilier développement et conservation est celui du nouveau pont traversant la rivière Neqarot, dans la vallée d'Arava (Israël). Les longs et larges accotements nécessitaient un mélange de sable et de gravier, lesquels ont été extraits immédiatement à l'amont du pont ainsi que d'un conglomérat voisin. Il en est résulté la dégradation du paysage local, alors qu'existe à la même distance en aval un réservoir fortement comblé dont le delta contient sables et graviers (Laronne et Wilhelm, 1999).

C'est de façon plus saine que les besoins en agrégats ont été abordés dans le Bassin de Besor dans le Neguev septentrional israélien. Ce cours d'eau est localement le plus important de ceux se jetant dans la Méditerranée. Son bassin versant dépasse 2 000 km<sup>2</sup>. Au lieu de poursuivre les autorisations d'extraction d'alluvions sans aucune considération des impacts, on a établi un plan d'excavation de matériaux sur le site d'un futur réservoir destiné à l'alimentation régionale en eau (Amnon Natif, communication personnelle). De plus, ces réalisations ne couvrent pas totalement la largeur du lit naturel (figure 3). L'eau est dérivée au-dessus d'un seuil à partir d'un niveau minimal de manière à maintenir un débit suffisant pour les besoins écologiques en aval. Dans ce type de milieu semi-aride, la charge de fond est très élevée, de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux régions humides (Reid et Laronne, 1995). Elle ne représente qu'une faible part de la charge solide totale, l'essentiel étant des particules fines suspendues (Powell et al., 1996). L'envasement d'un réservoir est donc rapide dans un tel milieu. Le dispositif permet à la charge de fond et à une bonne partie de celle en suspension d'être transférées vers l'aval, ce qui accroît substantiellement la durée de vie du réservoir. Les sédiments qui y pénètrent sont très fins de sorte qu'on prévoit de les exploiter pour les industries du ciment, de la brique ou autres. L'association du développement économique et de la conservation de l'environnement se révèle dans ce cas une combinaison heureuse, hautement souhaitable ailleurs.

**Jonathan B. Laronne**

---

*On a établi un plan d'excavation de matériaux sur le site d'un futur réservoir destiné à l'alimentation régionale en eau*

## Références bibliographiques

- Albertson, M.L., Molinas, A. and Hotchkiss, R., *Reservoir Sedimentation*. Colorado State University Conf. Proc., Rocky Mtn. Research Institute, 1900 pp, 1996.
- Kondolf, G.M., Managing bedload sediment in regulated rivers : examples from California, U.S.A. p. 165-176 in J.E. Costa, Miller, A.J., Potter, K.P and Wilcock, P.R. (eds.) : *Natural and Anthropogenic Influences in Fluvial Geomorphology*. AGU Geophys. Monograph 89, 239 pp., 1995.
- Laronne, J.B., Rhythmic couplets : sedimentology and prediction of reservoir design periods in semiarid areas. p. 229-244 in Wurtele, M.G. and Berkofsky, L. (eds.) : *Progress in Desert Research*. Rowman and Littlefield, Totowa, N.J., 353pp, 1987.
- Laronne, J.B., Probability distribution of event sediment yields in the Northern Negev, Israel. p. 481-492 in Boardman, J., Foster, I. and Dearing, J. (eds.) : *Soil Erosion in Agricultural Land*. Wiley, London, 1989.
- Laronne, J.B. Event-based deposition in the ever-emptying Yatir Reservoir, Israel. *Catena*, accepted - 1999.
- Laronne, J.B. and Reid, I., Very high rates of bedload sediment transport by ephemeral desert rivers. *Nature*, 36, 148-150 and 113, 1993.
- Laronne, J.B. and Wilhelm, R. Shifting stage-volume curves : predicting event sedimentation rate based on reservoir stratigraphy. in Anthony, D., Ethridge, F., Harvey, M., Laronne, J.B. and Mosley, M.P. (eds.) : *Applying Geomorphology to Environmental Management*. Water Resources Publ., Colorado, in press - 1999.
- Powell, M.D., Reid, I., Laronne, J.B. and Frostick, L.E., Bedload as a component of sediment yield from a semiarid watershed of the northern Negev. *Int'l Assoc. Hydrological Sciences*, Publ. 236, 389-397, 1996.
- Reid, I. and Laronne, J.B., Bedload sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts. *Water Resources Research*, 31 (3), 773-781, 1995.
- Reid, I., Powell, D.M. and Laronne, J.B., Flood flows, sediment fluxes and reservoir sedimentation in upland desert rivers. in Reid, I. (ed.) : *Catchment Management and Resource Assessment in Dry Areas*. John Wiley & Sons, Chichester, in press, 1998.
- Seydell, I., *Effects of land use on soil erosion, Ruhama Basin, Israel*. Unpublished Diplom Arbeit, Tech. Hochschule Darmstadt, 1998.

## Remerciements

Ce travail résulte d'une longue collaboration avec Moshe Taig, de l'Institut de Recherche Appliquée de l'Université Ben Gourion du Néguev. L'auteur remercie la Société EZUS, la Communauté Urbaine de Lyon, la Ville de Lyon, Gaz de France, les universités Claude Bernard, Louis Lumière et Jean Moulin pour leur invitation à la Chaire d'Environnement. Traduction du texte originel anglais par Pierre Clément, professeur de géographie à l'Université Lyon 2.