

Erosion et transport solide dans des petits bassins versants méditerranéens

JEAN ALBERGEL, YANNICK PEPIN

*LISAH, UMR ENSAM/INRA/IRD, Bat. 24 2, place Viola, F-34060 Montpellier Cedex 01, France
albergel@ensam.inra.fr*

SLAH NASRI

INRGREF, Rue Hédi Karray, BP 10, Ariana 2080, Tunisie

MOHAMED BOUFAROUA

DG ACTA, Ministère de l'Agriculture, 30 av. Alain Savary, 1002 Tunis, Tunisie

Résumé Une retenue artificielle de petite dimension, à l'exutoire d'un bassin versant est un lieu privilégié pour l'observation du bilan des matières solides transportées par le réseau hydrographique. Les produits de l'érosion collectés par l'écoulement superficiel sont piégés dans le réservoir à l'exception de ceux déversés, lors de rares débordements. Ces derniers sont estimés à partir de la connaissance des débits déversés et de leur concentration en matière en suspension. Un suivi des bilans hydrologiques et des dépôts sédimentaires dans sept retenues collinaires en zone semi-aride méditerranéenne (Maroc, Syrie et Tunisie) a permis de mettre au point un protocole expérimental de mesures et un modèle simple de calcul de la masse de sédiments exportée crue par crue. La base de données obtenue a été utilisée pour valider une cartographie des risques d'érosion et de tester des modèles de prédiction du transport solide. L'application du protocole de mesures à 19 autres lacs collinaires de l'Atlas Tunisien a permis de donner un ordre de grandeur de l'érosion à l'échelle de petits bassins versants cultivés dans différentes conditions écologiques.

Mots clefs Bassin méditerranéen; bassin versant; envasement; érosion; petits barrages

Key words Mediterranean basin; catchment hydrology; small dams; erosion; siltation

INTRODUCTION

L'expérience mondiale évalue le taux de perte en volume des barrages par sédimentation à 1% par an et à 130×10^9 US\$ le coût de récupération des volumes mobilisables d'eau ainsi perdus (Mahmood, 1987). Ce taux passe dans une fourchette de 3% à 10% en région méditerranéenne (Gazzalo & Bassi, 1969). Toutes les études, quelles soient à l'échelle locale ou à celle régionale montrent une grande difficulté à prévoir des valeurs des matières transportées par les écoulements de surface (Walling, 1994). Ces transports solides sont fonction des surfaces drainées, de l'usage des sols, de la forme du réseau hydrographique et des types de précipitations. Il évolue avec les changements d'occupation des terres et avec les fluctuations du climat (Olive & Rieger, 1991). Les données sur l'érosion des terres en région méditerranéenne proviennent, en majorité, de tests sur parcelles installées sur des versants cultivés, en parcours ou forestiers (Masson, 1971; Heusch, 1982). Ces parcelles donnent les taux

d'érosion aréolaire mais ignorent l'érosion ravinatoire, les glissements de terrain et les effondrements de berge.

Le suivi couplé des bilans hydrologiques et des bilans en sédiments des retenues d'eau naturelles (Luque & Julià, 2002) ou artificielles (Albergel *et al.*, 1999, 2001; Gregory, 2002) apparaissent comme une voie prometteuse de quantification du transport solide à l'exutoire des bassins versants.

DISPOSITIF EXPERIMENTAL, METHODES ET DONNEES

Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

Au cours du projet de recherche sur les lacs collinaires dans le pourtour méditerranéen (HYDROMED, 2001), sept petits barrages ont été équipés pour un suivi des bilans en eau et en sédiment au Maroc (1), Syrie (1) et Tunisie (5). Chaque barrage a été équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et d'un ensemble d'acquisition automatique des hauteurs d'eau et des intensités de pluie. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits.

La bathymétrie de chaque lac est effectuée au moins une fois par année hydrologique. Rapportée au nivellement fin du site, elle donne le volume de sédiments piégés dans la retenue. La concentration en matière en suspension des eaux déversées est mesurée à partir de prélèvements ponctuels sur le déversoir du barrage.

Une base de données informatisée permet l'extraction, la visualisation des grandeurs observées à différents pas de temps ainsi que celles de variables dérivées par calcul comme les volumes d'eau dans la retenues, les débits sortant au déversoir ou à la vanne de fond, les débits entrant dans la retenue, les surfaces inondées (Albergel & Rejeb, 1997). La Fig. 1 montre les pluies, l'évolution du plan d'eau et de la cote de vase dans la petite retenue de Kamech au Nord du Cap Bon en Tunisie. Cette base de données concerne les sept bassins du dispositif HYDROMED et 19 autres dans la dorsale tunisienne représentatifs de la diversité écologique rencontrée en Tunisie semi-aride.

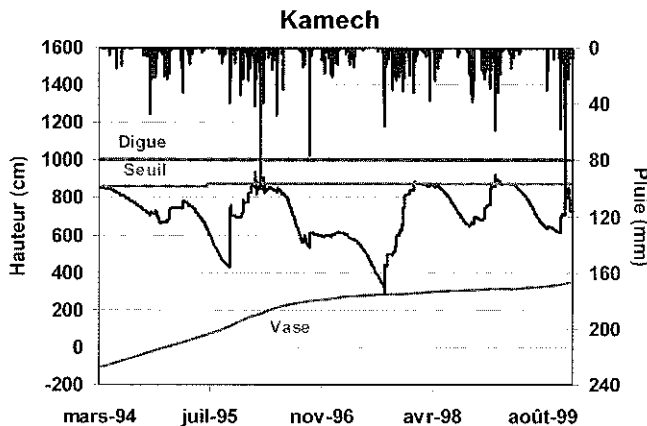


Fig. 1 Données hydrologiques et sédimentaires du barrage de Kamech, Tunisie.

Estimation du volume de sédiment dans la retenue et du transport solide

La bathymétrie de la retenue se fait par sondages ponctuels du fond de la retenue suivant des transversales matérialisées par un câble tendu entre les deux rives. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de recollement de la retenue. Un modèle numérique de terrain est réalisé (Fig. 2). La comparaison entre les volumes du réservoir à la cote de déversement, d'une mesure à l'autre, permet d'estimer la quantité de matériaux retenus. On attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage. Le transport solide entre deux mesures de bathymétrie est donc obtenu en ajoutant au volume de vase retenu dans le barrage et multiplié par sa densité, la masse de terre exportée par les débits liquides déversés:

$$T = V_s \times d + \sum_{i=1}^n S_i C_i \quad (1)$$

T transport solide total entre deux mesures bathymétriques [t], V_s volume de vase mesurée [m^3], d Densité de la vase, n nombre de crues ayant déversées entre deux mesures, S_i volume déversé pendant la crue i [m^3], C_i concentration moyenne en matière en suspension mesurée durant la crue i [$t m^{-3}$].

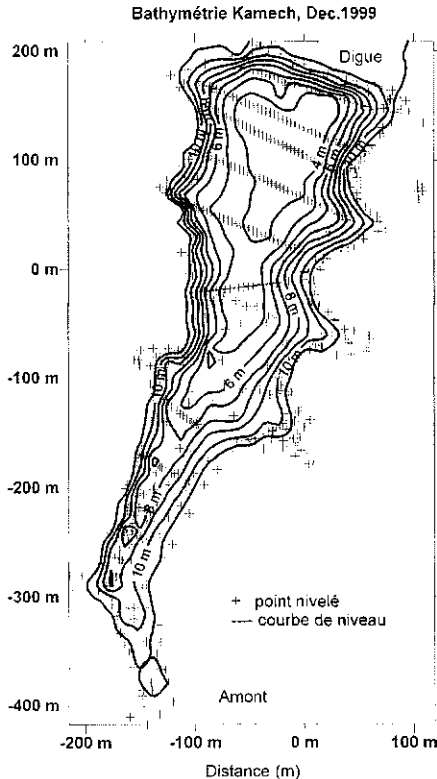


Fig. 2 Bathymétrie du barrage de Kamech (Décembre, 1999).

Estimation du transport solide crue par crue

La reconstitution des transports solides, crue par crue, est réalisée à partir de l'hypothèse de Williams (in Hadley *et al.*, 1985): A l'échelle d'un bassin élémentaire, le transport solide dépend du volume de la crue et de la forme de son hydrographe et peut s'exprimer par la relation suivante:

$$T_i = \lambda(Q_i \times V_i)^\beta \quad (2)$$

T_i représente l'apport en tonne de sédiments de la crue i ; V_i , le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir, en m^3 ; Q_i , le débit de la pointe de crue, en $m^3 s^{-1}$; λ est un paramètre représentant les sols des versants et leur occupation, β est un paramètre caractérisant le réseau hydrographique.

Pour chaque bassin, ces deux paramètres sont calculés par optimisation en comparant la somme des transports solides reconstitués entre deux mesures de bathymétrie et celle mesurée (équation (1)) (Albergel *et al.*, 1999).

RESULTATS, DISCUSSIONS

Envasement/Erosion

Le Tableau 1 récapitule les données d'envasement des sept barrages sur lesquels la méthode a été mise au point. Il montre que les transports solides spécifiques sont très variables d'un bassin à l'autre. Ils varient de $1.1 m^3 ha^{-1} an^{-1}$ (soit $1.8 t ha^{-1} an^{-1}$), sur un bassin de piémont bien aménagé en dispositifs anti-érosifs et assez boisé (El Gouazine en Tunisie), à $31 m^3 ha^{-1} an^{-1}$ (soit $50 t ha^{-1} an^{-1}$) sur un petit bassin très mameux des collines pré-rifaines au Maroc. Rappelons que l'USDA considère comme érosion "normale" en sol cultivé une érosion comprise entre 1 et $11 t ha^{-1} an^{-1}$ (Roose, 1994).

Tableau 1 Transports solides aux sept bassins HYDROMED.

Station	Localisation	Surface BV (ha)	Année const.	Volume vase (m^3)	Sédiments Exportés (t)	Erosion spécifique ($t ha^{-1} an^{-1}$)
El Gouazine	Tunisie Centre, vallée dans alluvions anciennes encroûtées—pléistocène. (Isohyète 400 mm)	1810	1990	16 030	1 300	1.8
Es Sénéga	Tunisie Centre, chaînon crétacé. Calcaires et marnes gypseuses (Isohyète 250 mm)	363	1991	21 760	2 725	17.5
Fidh Ali	Tunisie Centre, anticlinal éocène. Marnes gypseuses et lumachelles (Isohyète 400 mm)	238	1991	49 840	0	24.2
Kamech	Tunisie Centre, anticlinal du Cap Bon. Calcaire, grès et marnes (Isohyète 650 mm)	245.5	1993	29 440	18 350	32.0
M'Richet El Anze	Tunisie Centre, anticlinal du Bargou. Marnes et calcaires du crétacé (Isohyète 450 mm)	158	1991	9 610	190	12.2
Saboun	Maroc, Tangérois, schiste et marnes du Rif occidental (Isohyète 750 mm)	702	1991	162 450	21 725	50.2
Syndiané	Syrie piedmont de l'Anti liban. Epanchement basaltique (Isohyète 700 mm)	359	1967	40 770	28 940	3.8

Le même suivi sur les petits barrages tunisiens (19 + 5) montre une perte totale de volume de 585 200 m³ à la fin de l'année 1999 sur une capacité initiale de stockage de 2 634 000 m³, soit une perte de 22% pour une durée d'existence moyenne de 7.7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est donc de 4.6% par an (ordre de grandeur cité en Italie par Gazzalo & Bassi, 1969).

Reconstitution des transports solides crue par crue

La Fig. 3 montre la reconstitution par le modèle de Williams des transports solides crue par crue sur le bassin versant de Kamech. On voit bien que le phénomène d'envasement est lié à des événements paroxysmiques. Dans cette chronique de 6 années, trois crues ont apporté 50% du transport solide (27 février 1996, 18 janvier 1999 et 29 Novembre 1999). La dernière a contribué à elle seule à 23% du transport observé en 6 ans.

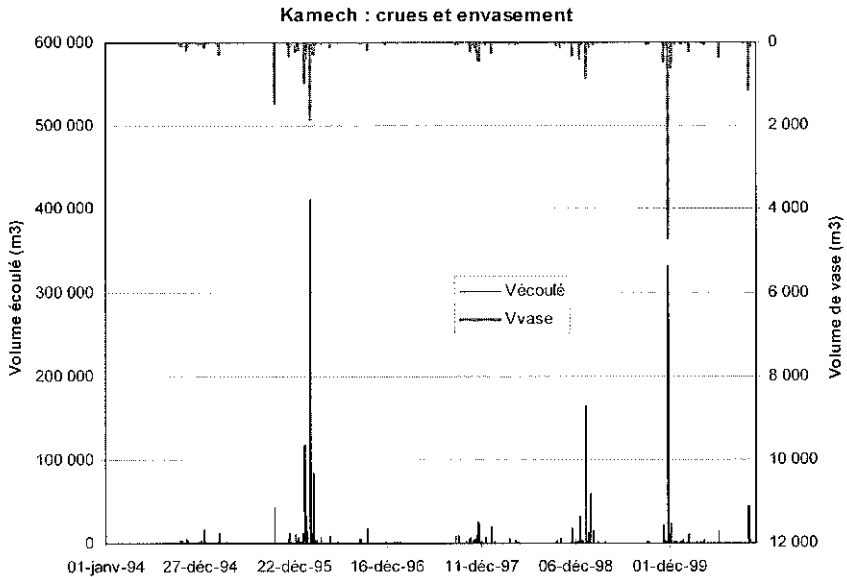


Fig. 3 Transports solides, crue par crue à Kamech (1994–2000).

Les données hydro—sédimentaires des barrages dans les études de l'érosion

En Tunisie, un premier usage de cette base de données a été de valider une méthode de cartographie des risques érosifs (Collinet & Zante, in HYDRAMED 2001). Un système d'Information Géographique a été construit pour 6 bassins versants de petits barrages à partir de la représentation des sols, de l'identification des usages des terres agricoles et des aménagements existants. Ce SIG permet la représentation spatiale de tous les paramètres de l'Equation Universelle des Pertes en Terre (USLE) adaptée à la Tunisie (Masson, 1971) et le calcul du transport solide pour des années climatiques

types. La comparaison des résultats avec les données d'envasement des barrages a permis de valider les cartes réalisées.

La comparaison des transports solides mesurés au petit barrage de Mrichet El Anze en Tunisie Centrale et les taux d'érosions mesurés sous simulation de pluie sur des toposéquences représentatives, a donné les résultats suivants (Hamed *et al.*, 2002):

- En période sans événements exceptionnels (du 1er Juillet 1992 au 18 mars 1995 et du 29 mars 1996 au 24 septembre 1999), l'érosion aréolaire sur les versants constitue la quasi totalité des transports solides; 96% pour la première période et 80% pour la seconde.
- En période avec de forts orages (du 18 Mars 1995 au 29 Mars 1996), cette forme d'érosion ne représente que 36% du transport solide total.

Au Maroc, la base de données sur les petits barrages a été utilisée par le programme national de recherche sur la modélisation de l'érosion au niveau des bassins versants (Merzouk & Alami, in HYDROMED 2001). Trois modèles ont été testés et évalués en fonction des facilités de leur mise en oeuvre et de la précision dans la prédiction du transport solide à l'exutoire: le modèle américain dit "Equation universelle révisée des pertes en sol, RUSLE", le modèle espagnol (IMPELERO, de l'IRNASE, www.imase.csi.es) et le modèle Tuniso-Canadien (SAGATELE, ENIT, Tunis). Le modèle IMPELERO, développé en Andalousie, a donné les résultats les plus satisfaisants en référence aux données de transports solides observés au barrage de Saboun.

CONCLUSION

Le dispositif présenté permet une mesure annuelle des masses de terre exportées par le bassin. Celles ci sont assimilées au transport solide spécifique du bassin versant. Il n'est évidemment pas envisageable, de multiplier de tels dispositifs sur la totalité des retenues déjà construites ou prévues. Il faut donc développer des modèles prédictifs de comportement en relation avec une typologie des bassins, cette typologie étant fondée sur des variables explicatives inhérentes aux événements pluvieux, aux caractéristiques morphopédologiques du bassin et aux variations des occupations, usages, voire aux aménagements de conservation des eaux et des sols (CES).

Le réseau de barrages équipés dans la région méditerranéenne a été conçu pour fournir les informations permettant la construction de cette typologie. Il est aussi l'outil expérimental d'une recherche qui consiste à observer les processus en jeu, à établir leurs liens avec le contenant physique du bassin versant et à synthétiser les relations obtenues sous la forme d'indicateurs comportementaux pertinents.

Remerciements Cette recherche a été réalisée dans le cadre du programme européen HYDROMED du 4ème Programme Cadre (1996–2001) et a reçu le soutien de la DG ACTA du Ministère de l'Agriculture Tunisien. Les auteurs adressent leurs remerciements les plus sincères à son Directeur Général: Si Habib Fahrat.

REFERENCES

- Albergel, J. & Rejeb, N. (1997) Les lacs collinaires en Tunisie: Enjeux, contraintes et perspectives. *C. R. à l'Ac. d'Agriculture de France* **83**(2), 77–88.
- Albergel, J., Nasri, S. & Boufaroua, M. (1999) Small dams water balance: experimental conditions, data processing and modeling in arid and semiarid areas. In: *Lund Institute of Technology, Report 322*, 45–58. Lund, Sweden.
- Albergel, J., Nasri, N., Boufaroua, M. & Pépin, Y. (2001) Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la dorsale tunisienne. *PHI-V Documents Techniques en hydrologie* **51**, 63–70.
- Gazzalo, T. & Bassi, G. (1969) Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituant les bassins versants des cours d'eau italiens. *Extraits de publications de l'Agence Italienne d'Hydraulique*, **53**.
- Gregory, N. N. (2002) The contribution of agricultural erosion to reservoir sedimentation in the Dominican Republic. *Water Policy* **3**(6), 491–505.
- Hadley, R. F., Lal, R., Onstad, C. A., Walling, D. E. & Yaïr, A. (1985) *Recent Developments in Erosion and Sediment Yield Studies*. UNESCO, Paris.
- Hamed, Y., Albergel, J., Pépin, Y., Asselinc, J., Nasri, S., Zante, P., Berndtsson, R., El Niazy, M. & Balah, M. (2002) Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion sensitive semiarid catchment. *Catena* **50**, 1–16.
- Heusch, B. (1982) Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi. *Rech. Biblio sur l'Afrique du Nord. Projet PNUD Rab/80/04*.
- HYDROMED (2001) Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen (ed. by J. Albergel & S. Nasri). *INCO DC ERBIC 18 CT 960091 – STD4 IRD / INRGREF* Tunis.
- Luque, J. A. & Julià, R. (2002) Lake sediment response to land-use and climate change during the last 1000 years in the oligotrophic Lake Sanabria (northwest of Iberian Peninsula). *Sedimentary Geol.* **148**, 343–355.
- Mahmood, K. (1987) Reservoir sedimentation: impact, extent, mitigation. *World Bank Technical Paper no. 71*. Washington DC, USA.
- Masson, J. N. (1971) L'érosion par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champs. Thèse USTL Montpellier, France.
- Olive, L. J. & Rieger, W. A. (1991) Assessing the impact of land use change on stream sediment transport in a variable environment. In *Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanations* (ed. by N. E. Peters & D. E. Walling) (Proc. Symp. at Vienna, August 1991), 73–81. IAHS Publ. no. 203.
- Roose, E. (1994) *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols* (GCES). Bulletin Pédologique de la FAO 70.
- Walling, D. E. (1988). Measuring sediment yield from river basins. In: *Soil Erosion Research Methods* (ed. by R. I.al). Soil and Water Conservation Society, 2nd edn, 39–82. Ankeny, Ohio, USA.