

# BILAN DE L'ÉROSION SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS DES LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE

Albergel J.\*, Nasri N.\*\*, Boufaroua M.\*\*\*, Pepin Y.\*

\* *Mission IRD, B.P. 434, 1004 Tunis*

\*\* *INRGREF, Ariana, Tunis*

\*\*\* *Ministère de l'Agriculture, D-CES 30 rue Alain Savary, 1002 Tunis*

## RESUME

Une retenue artificielle de petite dimension est un lieu privilégié pour l'observation des bilans d'érosion sur un petit bassin versant. La majorité des transports solides reste piégée dans le réservoir et la partie déversée, lors des rares débordements par le déversoir, peut être estimée à partir de la connaissance des débits déversés et de leur concentration. Un équipement hydro-pluviométrique du barrage couplé à des mesures annuelles de la bathymétrie du lac permet d'établir des bilans précis en eau et en sédiments du bassin versant drainé. Dans la zone semi-aride de la Tunisie Centrale, un réseau de 24 lacs collinaires a été équipé depuis 1993. Les données qu'il fournit peuvent être généralisées à l'ensemble des petits bassins versants de la dorsale tunisienne.

## INTRODUCTION

La majorité des mesures de l'érosion est faite sur des parcelles de taille standard (Wischmeier & al, 1971) et n'intéressent que l'érosion superficielle des sols. A l'exutoire d'un petit bassin versant, le transport de sédiments par la rivière est le résultat de différents processus qui comprennent l'érosion des sols sur les versants, les transferts ou stockage des sédiments, l'effondrement des berges, le charriage de fond, la déposition dans le réseau hydrographique. La connaissance du résultat de ces processus à l'exutoire du bassin intéresse, au premier chef, le concepteur d'ouvrages hydrauliques de rétention des eaux de ruissellement. L'expérience mondiale évalue le taux de perte en volume des barrages dans une fourchette de 3 à 10 % (Gazzalo & Bassi, 1969, Karouachov, 1977). Lorsque l'on s'intéresse aux petites infrastructures tunisiennes, on obtient un chiffre voisin de 5% annuel (CES-ORSTOM, 1997).

Les bassins versants expérimentaux sont reconnus, depuis longtemps, comme le dispositif de mesure le plus adéquat pour l'analyse des transports solides globaux (Toebes & Ourivaev, 1970, Dubreuil & al, 1972). Ils sont aussi le lieu privilégié pour la recherche sur les mécanismes du cycle de l'eau (Verel & Houi, 1994) et des interactions entre usage des sols, aménagements hydrauliques et disponibilité ou qualité de l'eau. La difficulté et le coût de gestion des réseaux pluviométriques et hydrométriques sur des bassins versants de petite taille constituent un handicap sérieux à une bonne connaissance des bilans en eau et en sédiments.

Une retenue alimentée par un seul tributaire, ou pour le moins, par un tributaire principal, est susceptible de fournir une information équivalente à celle que l'on peut obtenir d'une station hydrométrique classique. Pour cela, certaines conditions, souvent moins contraignantes et moins onéreuses que celles nécessaires au bon fonctionnement d'une station hydrométrique, doivent, tout de même, être satisfaites (Nouvelot, 1993).

En Tunisie Centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 30 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observations hydrologiques. Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant varie de quelques hectares à quelques dizaines km<sup>2</sup>. Elles sont aussi représentatives du gradient pluviométrique de la zone semi-aride à 250 mm de précipitation inter-annuelle jusqu'aux zones subhumides à 500 mm.

Après avoir montré le dispositif expérimental permettant d'analyser le bilan global de l'érosion sur ces bassins versants de retenue et fait le point sur les données, cette communication présente un modèle de reconstitution de l'envasement du barrage crue par crue. Elle discute ensuite de l'intensité de ce phénomène et des facteurs qui l'expliquent.

## DISPOSITIF EXPERIMENTAL, METHODES ET DONNEES

### Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

Un lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits.

La bathymétrie de chaque lac est effectuée périodiquement. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes «Hauteur / Volume et Hauteur / Surface». Sur les 30 bassins constituant le réseau d'observation des lacs collinaires (carte 1), des mesures bathymétriques ont été réalisées en nombre suffisant pour une interprétation sur 24 d'entre eux et de manière plus rapprochée, au moins une fois par année hydrologique.



*Carte 1 : Le réseau d'observations des petits barrages tunisiens (rouge : bathymétrie tous les ans)  
Des prélèvements ponctuels des eaux déversées permettent de connaître la matière solide exportée.*

### Estimation du transport solide et du volume de sédiment capturé par la retenue

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. Chaque point sondé (environ 500 par lacs) est défini par trois coordonnées cartésiennes (situation et profondeur). Une géostatistique par la méthode du Krigeage (Matheron, 1965), permet d'établir la relation «hauteur / volume» du lac. Le volume de vase est établi par différence des volumes utiles d'une année à l'autre. La figure 1 montre la bathymétrie du lac Fldh Ali (Bassin versant du Merguellil, Tunisie) mesurée en 1997. La retenue se comporte comme un piège à sédiments et lorsqu'elle n'a pas déversé, le volume de vase correspond au transport solide total produit par le bassin. La figure 2 montre sur la coupe AA l'évolution de la sédimentation de la retenue de 1991 à 1997. En cas de déversement, on attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage.

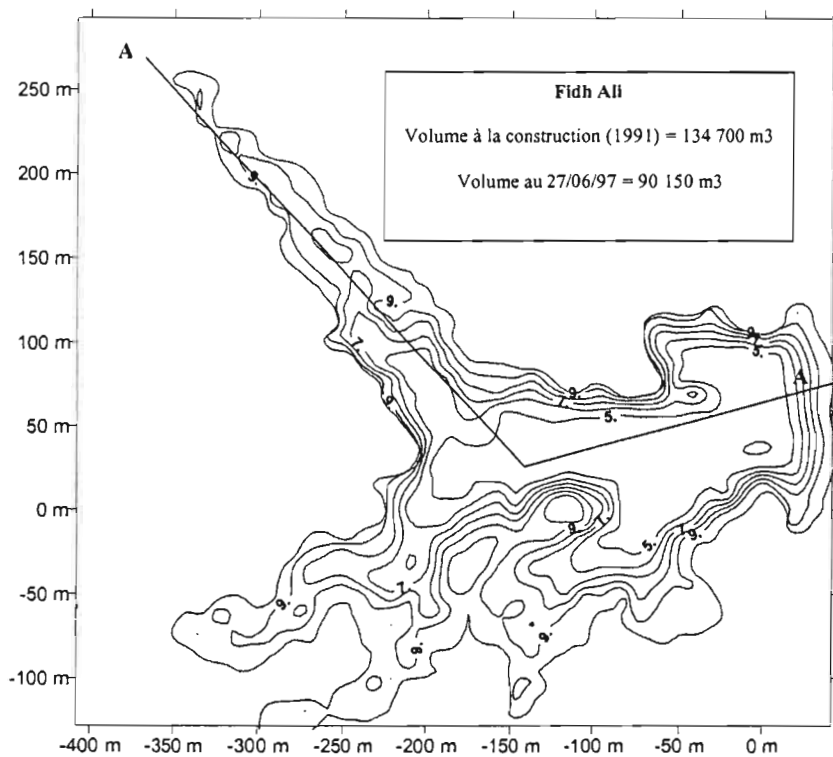


Fig. 1 : Bathymétrie de Fidh Ali 1997

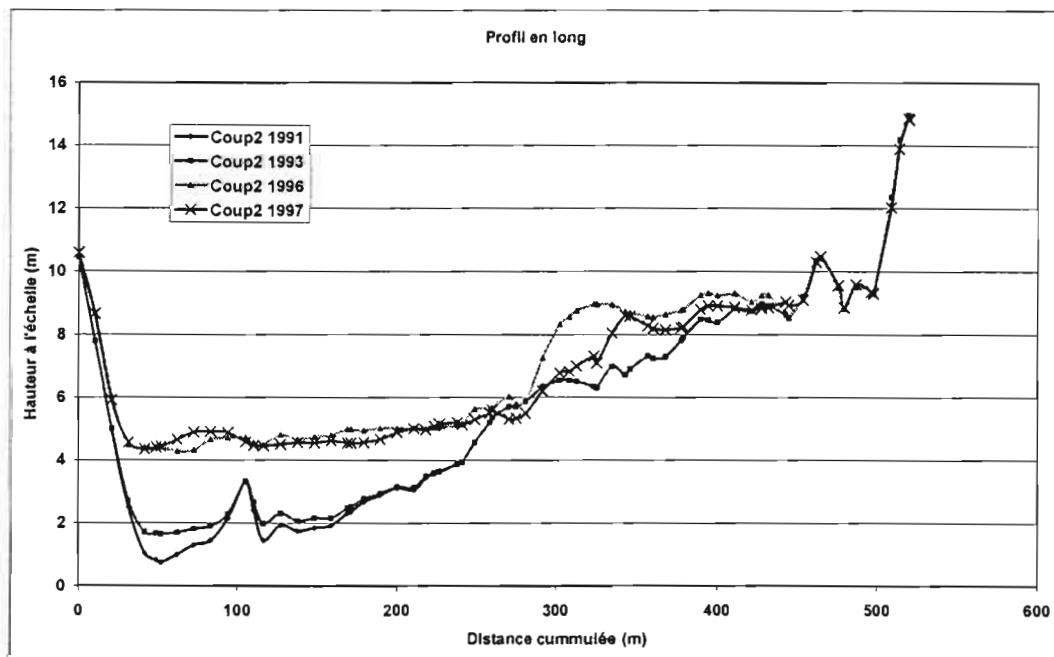


Fig. 2 : Evolution de la sédimentation de la retenue

Le transport solide pour un ou plusieurs événements est enfin calculé en multipliant le volume de vase par sa densité et en ajoutant la masse des sédiments exportés lors des déversements au dessus du réservoir.

## Estimation du transport solide crue par crue

La reconstitution des transports solides, crue par crue, assimilée à l'érosion globale du bassin, utilise une forme de l'équation universelle des pertes en terres développée par **Williams** (1977) et présentée par **Hadley & al** en 1985. Cette équation s'écrit :

$$A = \alpha(Vq_p)^\beta K(LS)CP$$

Où **A** représente l'apport en tonne de sédiments ; **V**, le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir, en m<sup>3</sup> ; **q<sub>p</sub>**, le débit de la pointe de crue, en m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ; **K** le facteur d'érodibilité du sol (il se mesure sur parcelle de référence et n'a pas d'unité) ; **(LS)**, le facteur exprimant la longueur et le degré d'inclinaison de la pente ; **C**, le facteur de couverture végétale ; **P**, le facteur des pratiques conservatrices effectuées sur les versants ;  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui, dans le système unitaire international prennent respectivement les valeurs  $\alpha = 11.8$  et  $\beta = 0.56$ .

Le produit  $\alpha K(LS)CP$  est caractéristique d'un bassin pour une saison donnée; le facteur **C** varie en fonction de l'état du tapis herbacé et du stade des cultures. Nous chercherons une valeur moyenne du produit  $\alpha K(LS)CP$  à partir des deux premières mesures d'envasement et nous la validerons en l'appliquant aux suivantes. Cette valeur moyenne est calculée par un modèle d'optimisation en comparant la somme des transports solides obtenue entre deux mesures de bathymétrie l'érosion calculée.

$$T_{sobs} = (V_{vobs} \times d) + \sum V_{dev} \times c$$

$T_{sobs}$  est le transport solide observé,  $V_{vobs}$  est le volume de vase accumulé dans la retenue entre deux mesures de bathymétrie,  $d$  est la densité de la vase,  $V_{dev}$  est le volume d'eau déversé pendant une crue et  $C$  est la concentration moyenne en matière solide des eaux déversées.

Les crues à l'entrée des barrages sont reconstituées suivant un modèle de bilan hydrologique au pas de temps de 5 minutes (CES – ORSTOM, 1996).

## RESULTATS

### Envasement / Erosion

Le tableau 1 récapitule les données d'envasement mesuré pour les 24 barrages. Les 24 unités « lacs collinaires », bien suivies par des mesures d'envasement depuis 1993, avaient une capacité initiale totale de stockage de 2 634 000 m<sup>3</sup>, elles ont perdu 585 200 m<sup>3</sup> en fin 1999, soit 22% pour une durée d'existence moyenne de 7.7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est de 4.6% par an. Suivant les sites, l'importance de l'envasement est très variable. Pour comparer l'envasement des différentes retenues, on a rapporté sa perte de volume à l'unité de surface de son bassin et à l'année. On remarque une forte variabilité de l'envasement annuel moyen d'un bassin à l'autre, celui ci passe de 1 m<sup>3</sup>/ha/an pour les bassins faiblement ruisselant comme celui de Seghir qui se trouve essentiellement sur le cordon sableux de Nabeul à environ 18m<sup>3</sup>/ha/an pour des bassins versants avec marnes gypseuses fournissant de fortes charges solides.

TABLEAU 1 : Envasement et érosion

Station	Surface BV ha	année création	mois dernière mesure	volume initial m3	Volume de sédiments stockés m3	Durée de vie de l'ouvrage années	Envas. rapporté à la surface du bassin et par an m3/ha/an
Sadine 1	384	1988	juin-99	35 070	34 610	11	8.2
Sadine 2	653	1990	sept-98	82 400	82 370	8	15.8
Fidh ben Naceur	169	1990	mai-99	47 110	14 720	29	9.7
Fidh Ali	413	1991	sept-98	134 710	46 235	20	16.0
M'Richet el Anse	158	1991	mars-98	42 400	8 665	34	7.8
El Gouazine	1810	1990	mai-98	237 030	16 030	>100	1.1
Hadada	469	1992	mai-96	84 970	14 060	24	7.5
Janet	521	1992	mai-98	94 280	55 910	10	17.9
El Hnach	395	1992	mai-96	77 400	18 770	16	11.9
Abdessadok	307	1990	sept-98	92 820	25 960	29	10.6
Dekikira	307	1991	juin-96	219 100	21 300	51	13.9
Es Senega	363	1991	juin-98	86 420	27 778	22	10.9
Echar	917	1993	juin-96	186 840	5 300	>100	1.9
Abdeladim	642	1992	juil-99	174 870	6 900	>100	1.5
Arara	708	1993	sept-98	91 150	58 940	8	16.6
El Moudhi	266	1991	sept-98	142 770	26 980	37	14.5
Sbahia 1	324	1993	oct-96	135 570	10 550	39	10.9
Saadine	272	1992	sept-98	35 620	27 610	8	16.9
Es Seghir	431	1992	oct-96	192 460	2 020	>100	1.2
El Melah	85	1991	août-99	19 875	4 778	36	7.0
Kamech	246	1993	juil-99	142 100	25 765	33	17.5
Brahim Zaher	464	1992	sept-99	86 190	31 620	21	9.7
Baouejjer	486	1991	juin-96	66 030	6 510	51	2.7

En faisant l'hypothèse, que la moyenne de l'envasement sur la période d'observation (1993-1999) est représentative du régime hydrologique (deux années excédentaires, deux années sèches et deux années moyennes), on peut estimer une durée de vie moyenne des barrages (comblement jusqu'à la cote du déversoir) : 30 % des lacs auraient une durée de vie inférieure à 20 ans et environ 29% une durée de vie supérieure à 50 ans. La durée de vie moyenne face à l'envasement de l'ensemble des lacs serait de l'ordre de 40 ans.

### Reconstitution des transports solides crue par crue : Modèle d'érosion

Le modèle de Williams a été appliqué à cinq retenues parmi les 24 observées. Il peut être généralisé à toutes les retenues. Dans le cadre de cette note les cinq barrages pour lesquels le modèle a été appliqué, sont étagés en latitude est leurs bassins versants sont représentatifs de la géologie de la dorsale Tunisienne. Le tableau 2 donne la dimension des bassins versants choisis, les coordonnées géographiques des barrages, les caractéristiques géologiques des bassins versants, la période de calage du modèle et la valeur du paramètre. Une validation du modèle a été réalisée avec les mesures d'envasement postérieures à la période de calage en utilisant le coefficient obtenu sur la dernière période dans le calage. La figure 3 compare les érosions calculées et observées pour les périodes de calage et pour les périodes de validation du modèle. Au site d'El Gouazine, où un important aménagement en banquettes anti-érosive a été installé en 1996, les valeurs de  $\alpha K(LS)CP$  sont très différentes pour les deux périodes de mesures de bathymétrie. Nous n'avons pas fait de validation, celle ci sera faite à l'occasion d'une prochaine mesure d'envasement.

TABLEAU 2 : Modélisation de l'érosion sur cinq bassins

Lac collinaire	Coordonnées	Géologie	Périodes de calage	Périodes de validation	$\alpha K(LS)CP$
Kamech 245 ha	36°52'18" N 10°52'08" E	Flanc est de l'anticlinal du Cap Bon sur marne, calcaire et grès.	1995-1996	1998-1999	1.22
			1996-1998		1.21
Mrichet El Anze 158 ha	36°05'37" N 09°35'41" E	Flanc nord ouest du chaînon anticlinal du Bargou, calcaire et marne du crétacé, reliquat d'encroûtement calcaire du villafranchien	1995 -1996	1996 -1998	2.29
El Gouazine 1810 ha	35°54'30" N 09°42'13"	Vallée dans des alluvions anciennes encroûtées pléistocène dominées en rive gauche par la crête calcaire éocène	1993-1996		0.63
			1996-1997 (aménag. entre les 2)		0.05
Fidh Ali 238ha	35°42'40" 09°36'13"	Flanc sud ouest d'un anticlinal , BV entièrement situé dans les formations éocène : marnes gypseuses et lumachelles	1993-1996	1997-1998	3.71
			1994-1996		1998-1999
Essenega 353 ha	35°29'21" 09°06'18"	B.V. dominé par un chaînon du Jbel Semama calcaire du crétacé. Système de faille révélant à l'aval des marnes gypseuses	1995-1996	1997-1998	1.60

La comparaison des valeurs observées et calculées de l'érosion montrent une dispersion plus importante des points en validation qu'en calage. Ce modèle est assez grossier, il pourrait être affiné par un calcul des paramètres K, LS, C, et P à partir d'une cartographie des états de surface. Il est cependant d'une précision suffisante pour simuler une érosion crue par crue du bassin à partir de la connaissance de la variation de la bathymétrie entre deux périodes et la concentration des déversements (figure 4).

L'épisode pluvieux du 28 au 30 Novembre 99 qui a été encadré par deux mesures de bathymétrie et sur lequel des mesures de concentration des eaux déversées ont été réalisées (moyenne des échantillons = 25g/l) a donné l'occasion de vérifier ce modèle (Tableau 3).

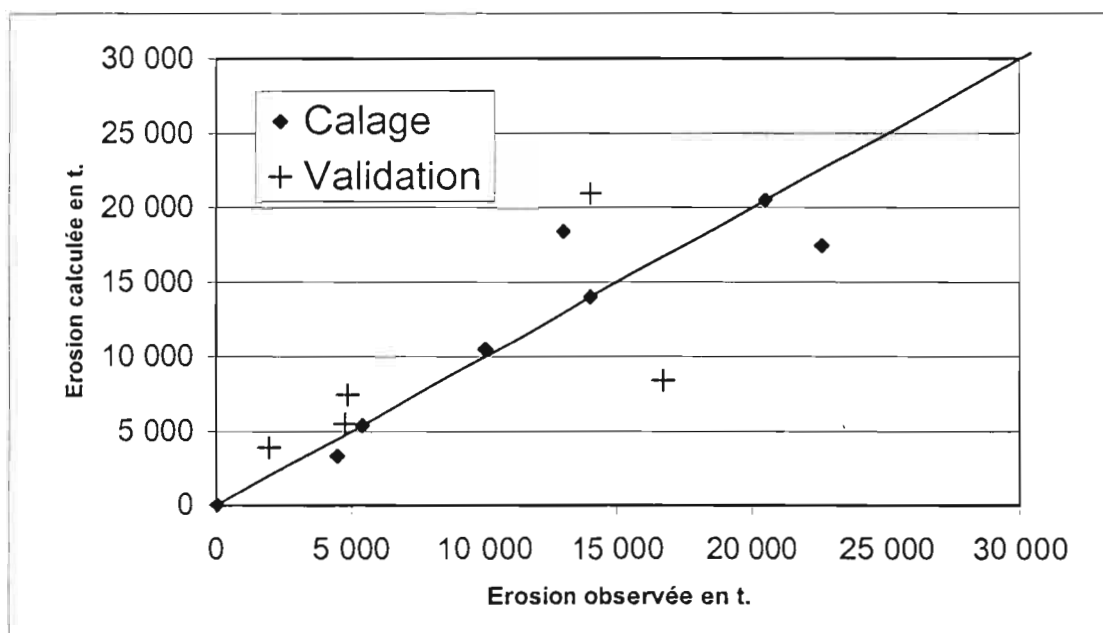


Fig. 3 : Comparaison des érosions calculées et observées en calage et en validation

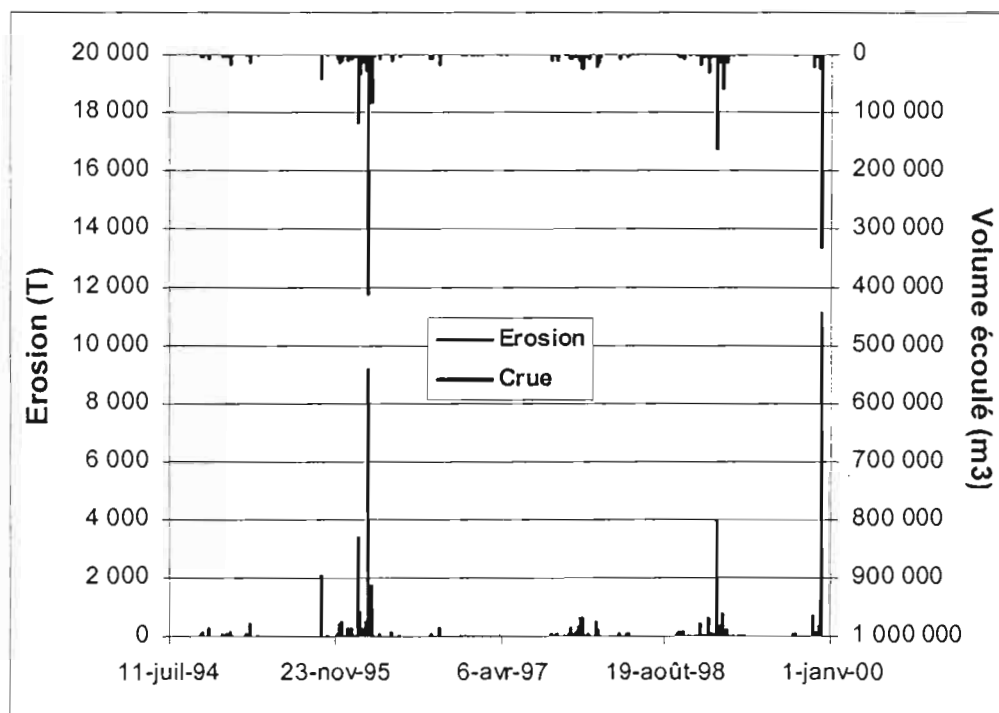


Fig. 4 : Simulation des érosions crue par crue\*

La figure 4 montre 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 pour 23% du transport observé en 6 ans.

TABEAU 3 : Validation du modèle sur l'événement du 27 au 29 Novembre 1999

Date	Pluie mm	V stocké m3	V déversé m3	V total m3	Qmax m3/s	Erosion calculée T	Sédiment exporté calculé T	Envasement calculé m3
27-28/11/99	51.0	23 100	0	23 100	1.0	340	0	283
29-30/11/99	145.5	35 773	294 892	330 665	35.4	11 120	7 962	2 632
<b>Envasement mesuré (m3)</b>		<b>2 846</b>		<b>Envasement calculé (m3)</b>		<b>2 915</b>		

## CONCLUSION

La forte variabilité des érosions observées sur 24 bassins versants, tous situés dans la dorsale tunisienne, montre la difficulté de mettre au point un système d'estimation simple pour prédire l'envasement des barrages. Les mesures effectuées doivent cependant être interprétées en fonction des particularités de chaque bassin pour arriver à dégager des indicateurs pertinents. La géologie, la taille et la forme du bassin et l'occupation des sols semblent être les indicateurs adéquats. Les bassins sur marnes gypseuses et ceux fortement défrichés sont les plus sensibles. Dans les bassins allongés où le réseau hydrographique entaille des formations dures (calcaires), les barrages sont protégés, les produits de l'érosion se déposent aux ruptures de pente.

Le bassin versant d'El Gouazine montre aussi l'efficacité des aménagements anti érosifs en banquettes mécaniques isohypses. Le facteur aKLSCP du modèle passe de 0.6 à 0.05 après l'aménagement, cela correspond à une diminution globale de l'érosion d'un facteur de 10.

Les lacs sont de très bons pièges à sédiments. Ils remplissent un rôle de protection pour des barrages de plus grandes tailles situés en aval. Mais leur colmatage rapide va à l'encontre d'un développement agricole. Implantés dans des environnements fragiles et à faibles activités économiques, ils sont perçus comme une ressource supplémentaire, rare et vitale : l'eau. Pour pérenniser cette ressource, l'aménagement des versants pour protéger ces lacs devient une priorité. La nature et la densité de ces aménagements doivent concilier la réduction du transport solide sans pour autant priver le lac de ces apports en eau par ruissellement.

## BIBLIOGRAPHIE

- CES - ORSTOM (1996) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995. Réseau piloté de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 140 p.
- CES - ORSTOM (1997) Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Min. De l'Agr. CES/ORSTOM. Tunis. 184 p.
- DUBREUIL P., Chaperon P., Guiscafré J., Herbaud J. (1972) Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- 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*, n° 53.
- HADLEY R.F, LAL R., ONSTAD C.A., WALING D.E., YAÏR A. (1985) Recent developments in erosion and sediments yield studies. UNESCO, Paris
- KARAOUCHOV A.V., (1977) Les débits solides, analyses et répartition géographiques. Hydrométéoidat, Leningrad, 238 p.
- MATHERON G. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Paris : Masson, 360p.
- NOUVELOT J.F. (1993) Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH/ORSTOM/CEMAGREF/FAO . Montpellier. 500 p.
- TOEBES, C., OURIVAEV, V. (1970) Representative and experimental basins. An international guide for research and practice. UNESCO *Studies and reports in Hydrology* n°4 348p.
- VEREL J.L. & HOUÏ D. (1994) Du concept de Bassin Versant Représentatif à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales, actes du Séminaire, GIP Hydrosystème, CEMAGREF PARIS, Mai 1994.
- WILLIAMS J.R. (1977) Sediment delivery ratios determined with sediment and runoff models. *AISH*, publi. 122.
- WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B., CROSS B.V. (1971) A soil erodibility monograph for farm land and construction sites. *J. of soil and water* Vol 265.