

## 7

# **Impact des travaux anti-érosifs sur les crues et le transport solide en Tunisie centrale**

M. BERGAOUI <sup>1</sup>, H. CAMUS <sup>2</sup>

*1. École Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural, Medjez el-bab, Tunisie*

*2. ORSTOM Tunis, Tunisie*

Dans les zones semi-arides, voire arides, caractérisées par une pluviométrie faible et très irrégulière, les facteurs climatiques jouent un rôle considérable sur la perte en sol. En effet, en arrivant au sol, la pluie agit par ses différentes composantes, à savoir la hauteur de pluie tombée, son intensité, sa distribution spatio-temporelle.

Dans certaines conditions, le processus d'érosion peut être déclenché [1]. Les particules du sol détachées se trouvent transportées par ruissellement. En absence d'aménagements anti-érosifs, ces particules finiront, en un temps plus ou moins long, par venir se déposer dans les retenues, provoquant ainsi leur envasement et limitant de ce fait leurs capacités de stockage et également leur durée de vie.

Pour tenter d'atténuer l'ampleur de ces phénomènes et essayer d'agir d'une façon efficace pour sauvegarder le milieu physique, il est nécessaire de connaître avant tout la relation pluie-ruissellement-érosion afin de déterminer les facteurs les plus significatifs, responsables de l'érosion hydrique.

Les résultats présentés ici sont relatifs aux observations faites sur les micro-bassins expérimentaux de Tebaga au cours de la période 1987-1993. Nous déterminerons, dans un premier temps, l'impact des travaux anti-érosifs sur les hydrogrammes de crues, leurs

caractéristiques et leurs formes et le transport solide. Enfin, prenant en compte les événements érosifs, nous avons calé un modèle statistique de régression multiple qui donne des résultats satisfaisants.

## Caractéristiques physiques des micro-bassins versants de Tebaga

Les micro-bassins versants expérimentaux de Tebaga sont situés dans le djebel Semmama à une quinzaine de kilomètres de la ville de Sbeitla. Ils se trouvent inclus dans le bassin versant de l'oued Zioud, qui, avec l'oued Dhiar et l'oued Diss, constitue en aval l'oued El Hissiane (Figure 1).

### Caractéristiques physiques des micro-bassins

Les caractéristiques morphométriques des micro-bassins versants sont résumées dans le Tableau I [3, 4].

**Tableau I.** Caractéristiques morphométriques des micro-bassins versants.

Nom du bassin versant	Tebaga 1	Tebaga 2	Tebaga3
Surface (km <sup>2</sup> )	0,0081	0,0079	0,0332
Périmètre (Km)	0,3600	0,3600	0,7500
Coefficient de forme (Kc)	1,1300	1,2000	1,1500
Longueur du rectangle équivalent (km)	0,1030	0,1290	0,2290
Largeur du rectangle équivalent (km)	0,0780	0,0610	0,1450
Altitude maximale (m)	975	960	932,5
Altitude minimale (m)	905	902,5	880,8
Altitude moyenne (m)	937	917,7	890,6
Indice de pente globale : Ig (mm/m)	0,5670	0,4000	0,2040
Indice de pente de ROCHE : Ip (m/km)	0,7930	0,6650	0,4670
Dénivelée spécifique : Ds (m)	0,0510	0,0355	0,0371

Dans ce tableau, on remarque que les micro-bassins versants de Tebaga 1 et Tebaga 2 sont de taille très voisine.

Les micro-bassins de Tebaga 1 et Tebaga 2 sont caractérisés par un sol brun calcaire (11). La végétation des trois micro-bassins versants se répartit selon trois classes : ligneux, ligneux bas et herbacées, d'après l'étude phyto-écologique globale du bassin versant de l'oued El Hissiane [2].

Chacun des trois micro-bassins versants est équipé d'appareils de mesure de la pluviométrie, de la limnimétrie et du transport solide [3]. Ce dernier est récupéré dans une fosse à sédiments, vidée et récurée après chaque crue, dans la mesure où celles-ci ne sont pas

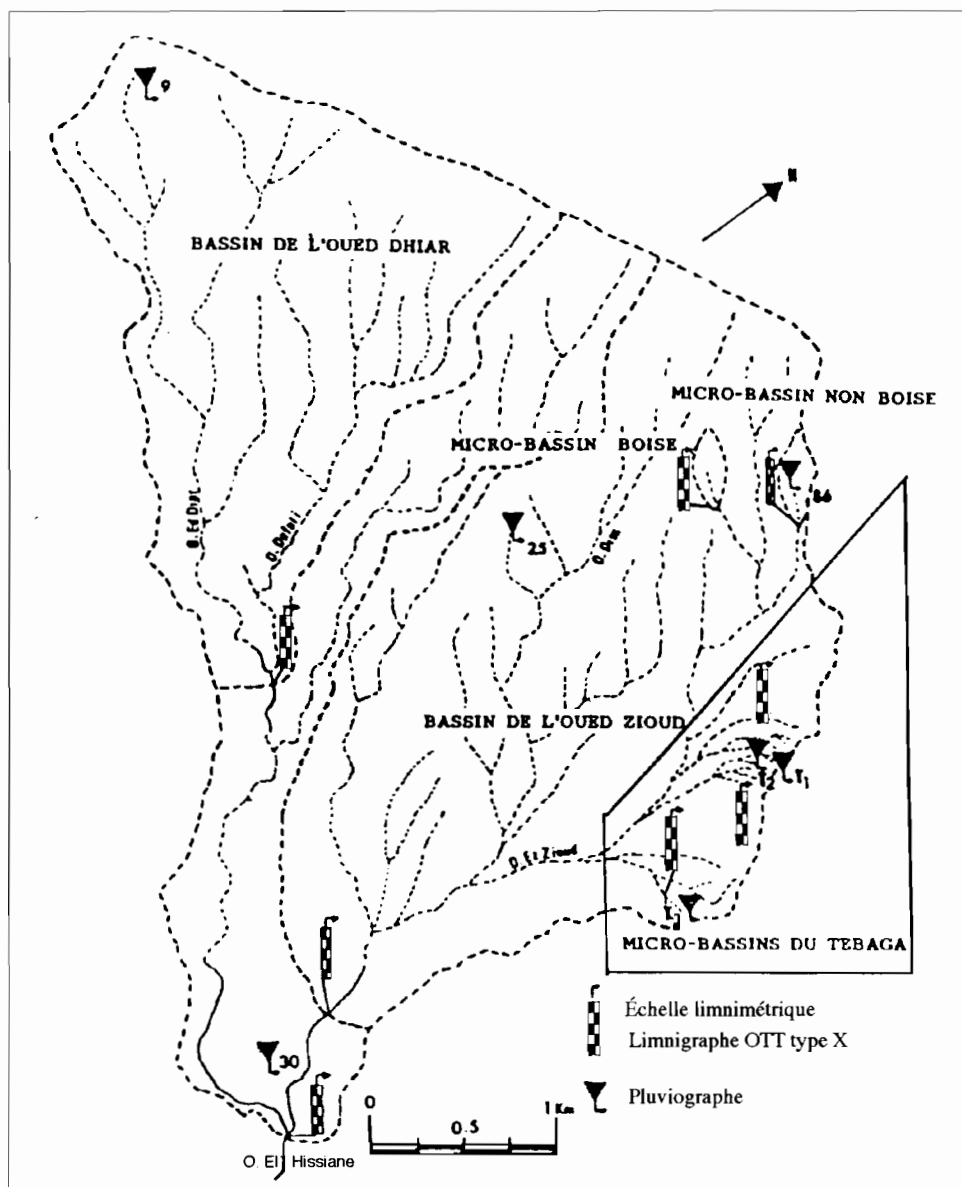


Figure 1. Le bassin versant de l'oued El Hissiane.

trop rapprochées dans le temps. Les dépôts sont séchés à l'air, pour être ensuite pesés et analysés au laboratoire.

### Aménagements anti-érosifs

Le plan d'aménagement en travaux anti-érosifs des trois micro-bassins versants de Tebaga a été réalisé en même temps que celui du bassin versant de l'oued Ez-Zioud, sous

la direction de l'équipe de la Conservation des Eaux et des Sols de Kasserine en 1990. Les travaux sur les micro-bassins de Tebaga (Tebaga 1 et Tebaga 3) ont été achevés en octobre 1990, ceux de l'oued Ez-Zioud courant 1992.

Une mise en défens avait été tentée sur les deux micro-bassins versants de Tebaga 1 et de Tebaga 3, afin d'éviter le surpâturage ou l'exploitation des ligneux hauts. Ces micro-bassins versants, compte-tenu de leur morphologie et surtout de leurs pentes, sont aménagés par des travaux de type cordons, murets ou encore petits barrages en pierres sèches. Le rôle des cordons pierreux est avant tout de ralentir le ruissellement et surtout de permettre le stockage des matières solides en amont des cordons. Ces cordons disposés parallèlement aux courbes de niveau jouent un rôle de frein hydraulique en augmentant la rugosité du sol.

## Données

L'étude est développée en se basant sur les données collectées durant la période 1987-1993. Pour Tebaga 2, non aménagé, on dispose de sept années de mesures. Pour les deux autres, il y a eu deux campagnes de mesures : l'une avant aménagement, de 1978 à 1990, l'autre après aménagement, de 1990 à 1993. Tous les résultats du dépouillement des données brutes se trouvent dans le rapport de Mouelhi [4].

Les Tableaux II et III donnent pour chaque micro-bassin le nombre total d'événements enregistrés avant et après aménagement, ainsi que le pourcentage de ceux ayant engendré un ruissellement.

**Tableau II.** Evénements avant aménagement anti-érosif (1987-1990).

	Tebaga 1	Tebaga 2	Tebaga 3
Période d'observation	1987 - 1990	1987 - 1990	1987 - 1990
Nombre total d'événements pluvieux	110	110	102
Nombre d'événements engendrant un ruissellement	44 (40 %)	44 (40 %)	29 (28 %)
Hauteur ruisselée (mm)	22,80	26,51	26,31
Hauteur ruisselée maximale (mm) (pour un événement)	3,70 (08 août 1989)	4,89 (08 août 1989)	5,17 (22 août 1989)

Le pourcentage des averses ayant provoqué un ruissellement sur Tebaga 1 est identique à celui de Tebaga 2. Ceci n'est pas surprenant, compte tenu de leur proximité et de leurs caractéristiques physiques et géomorphologiques très semblables.

La somme des hauteurs ruisselées sur Tebaga 1 et Tebaga 2 est quasi identique. La faible différence est peut-être à attribuer, en partie, aux erreurs de mesures.

Le pourcentage des crues engendrant un ruissellement sur Tebaga 3, que ce soit avant ou après aménagement, est inférieur à celui de Tebaga 1 ou Tebaga 2. Ceci montre bien l'effet des caractéristiques physiques, en général, et de la pente, en particulier.

**Tableau III.** Evénements après aménagement anti-érosif (1990-1993).

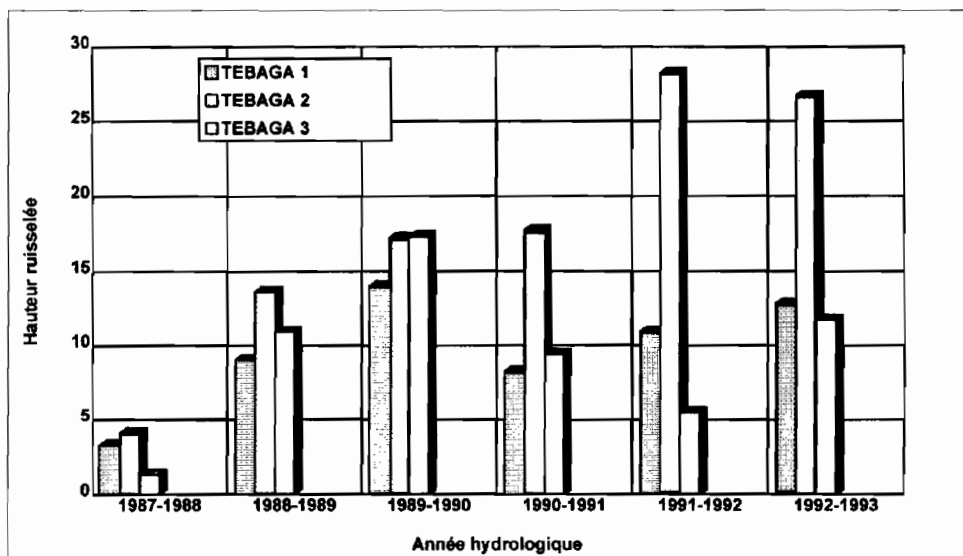
	Tebaga 1	Tebaga 2	Tebaga3
Période d'observation	1990 - 1993	1990 - 1993	1990 - 1993
Nombre total d'événements pluvieux	155	155	132
Nombre d'événements engendrant un ruissellement	51 (33 %)	51 (33 %)	31 (23 %)
Hauteur ruisselée (mm)	38,10	79,82	30,78
Hauteur ruisselée maximale (mm)	5,46 (6 nov. 1992)	14,07 (6 nov.1992)	7,72 (6 nov. 1992)

Au cours de la seconde phase, après aménagement des Tebaga 1 et Tebaga 3, on constate une différence significative dans le comportement hydrologique de ces deux bassins. La hauteur ruisselée égale à 38,1 mm pour Tebaga 1 atteint 79,8 mm sur Tebaga 2, soit une différence de l'ordre 52 %.

Les lames ruisselées maximales observées sur Tebaga 1 et Tebaga 2, toutes deux liées à la crue du 6 novembre 1992, sont respectivement de 5,46 mm et 14,07 mm. Pendant cette deuxième phase, on assiste donc à une différence par événement, de l'ordre de 61%.

Nous avons porté sur le graphique de la Figure 2, pour chaque micro-bassin versant, les valeurs des hauteurs ruisselées correspondant à chaque année hydrologique afin de montrer l'impact des travaux anti-érosifs sur le ruissellement.

On observe qu'en l'absence de traitement anti-érosif les valeurs des hauteurs ruisselées pour chaque micro-bassin versant sont très voisines. Par contre, après aménagement de Tebaga 1 et 3, la diminution est très significative.



**Figure 2.** Répartition de la hauteur ruisselée suivant les années hydrologiques.

On peut d'ores et déjà conclure que les travaux de conservation des eaux et des sols permettent une réduction globale significative du ruissellement, dépassant 52 %, réduction pouvant dépasser 60 % pour les crues les plus fortes.

## **Impact sur les hydrogrammes de crues**

Par définition, la crue est la réponse d'un bassin à une averse ou à un épisode pluvieux [5]. Son étude est liée à des grandeurs qui, d'une part, décrivent la variation du débit et, d'autre part, caractérisent l'événement pluvieux qui en est la cause.

L'objectif de cette partie de l'étude est d'obtenir une représentation globale de la forme et des caractéristiques moyennes et maximales des crues observées, afin de quantifier l'impact des travaux anti-érosifs réalisés sur deux des trois micro-bassins versants expérimentaux étudiés.

### **Analyse des crues**

Après un examen de toutes les crues observées, et au vu du tracé des hydrogrammes, nous avons pu classer l'ensemble des crues en deux groupes :

- crues complexes, résultant d'une averse complexe, à plusieurs pics ;
- crues à pointe unique provoquées par une averse de courte durée et de forte intensité.

Dans cette partie de l'étude, on s'est intéressé uniquement à l'étude des crues simples.

Pour cela, nous avons tracé, pour chaque micro-bassin, les hydrogrammes enveloppes et médians. La méthodologie adoptée est la suivante.

Les hydrogrammes sont tous centrés sur la pointe maximale de crue. Ensuite, on prend les valeurs maximales par tranche pour l'hydrogramme enveloppe, et la moyenne des valeurs pour l'hydrogramme médian. Sur les averses correspondantes à ces hydrogrammes, nous avons procédé de la même façon pour tracer les hydrogrammes médians et enveloppes.

L'examen des hydrogrammes tracés (Figures 3 et 4) montre que les crues sont écrêtées après aménagement du micro-bassin versant. En effet, l'hydrogramme passe d'une forme très aiguë à une autre plus étalée (cas Tebaga 1 et 3). Cette diminution du débit maximum s'accompagne d'une augmentation du temps de base et d'une diminution du volume ruisselé. Les conclusions suivantes sont à retenir :

- une diminution significative du débit maximum (variation en moyenne de l'ordre de 32 % jusqu'à un maximum de 50 %) ;
- une augmentation du temps de montée de l'ordre de 3 à 5 minutes ;
- une augmentation du temps de base de l'ordre de 20 à 35 minutes.

La superposition des hydrogrammes obtenus pour Tebaga 1 après aménagement et pour Tebaga 2, bassin témoin (Figure 4) nous a permis de tirer les résultats regroupés dans le Tableau IV.

Le graphique de la Figure 5 montre l'impact des travaux de conservation des eaux et des sols sur le débit maximum.

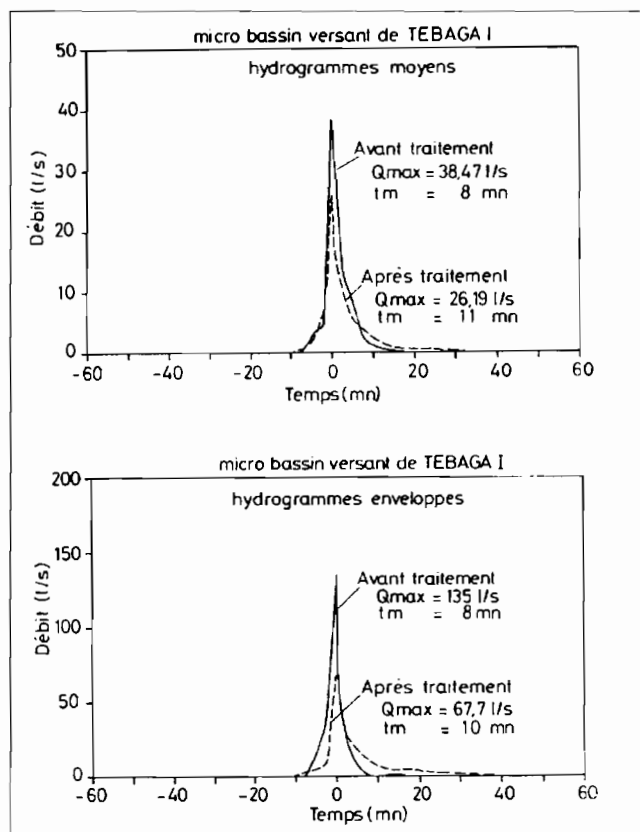


Figure 3. Hydrogrammes moyens et enveloppes.

Tableau IV. Comparaison des débits maxima observés à Tebaga 1 et 2.

	Tebaga 1 (Après aménagement)	Tebaga 2 (Non aménagé)	Rapport (%) Q1/Q2	Ecart relatif (%) (Q2-Q1)/Q2
Débit maximum (l/s) (Hydrog. enveloppe)	67,7	219,9	31	69
Débit maximum (l/s) (Hydrog. moyen)	26,19	54,52	48	52

Suite aux travaux de conservation des eaux et du sol, les débits maxima ont subi une diminution très nette. L'écart relatif, par rapport au bassin témoin, varie de 52 % (en moyenne) à 69 % (au maximum). En ce qui concerne le volume ruisselé, on a constaté une baisse de l'ordre de 30 %.

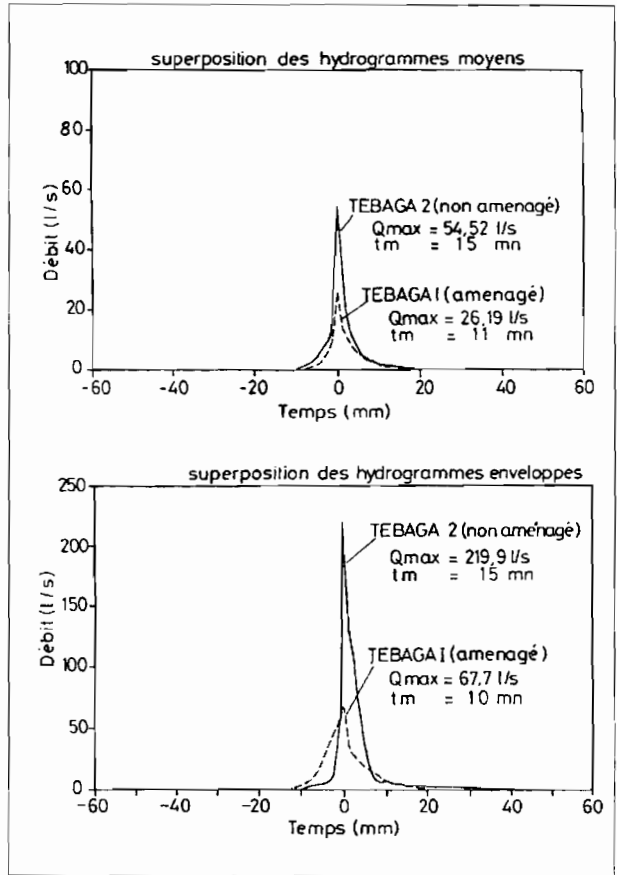


Figure 4. Superposition des hydrographes moyens et enveloppes.

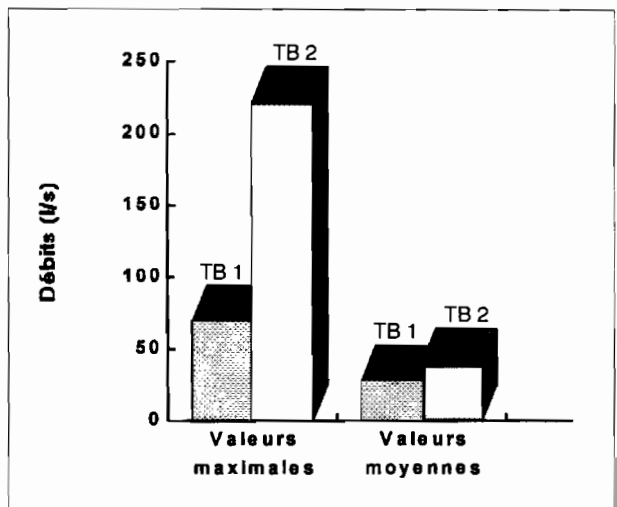


Figure 5. Impact des travaux de CES sur le débit maximum de crue.



## Impact des travaux anti-érosifs sur le transport solide

Pour montrer l'impact significatif des travaux anti-érosifs sur le transport solide, nous donnons dans le tableau V la valeur du transport solide spécifique annuel (tonne/ha), mesurée sur les trois micro-bassins versants.

**Tableau V.** Transport solide spécifique annuel(t/ha).

	1987-1988	1988-1989	1989-1990	1990-1991	1991-1992	1992-1993
Tebaga 1	0,195	5,001	1,308	0,518	0,390	0,748
Tebaga 2	0,204	4,265	1,276	0,964	3,918	5,649
Tebaga 3	0,063	1,585	0,892	0,088	0,035	0,032
R1/2 %	96	117	102	54	10	13
R3/2 %	31	37	70	9	1	0,6

On remarque que les rapports R1/2 (l'aménagement de Tebaga 1/Tebaga 2) et R3/2 (Tebaga 3/Tebaga 2) diminuent très sensiblement à partir de 1990-1991.

L'érosion sur le micro-bassin versant de Tebaga 1 semble un peu plus importante que sur le Tebaga 2 pour les trois années correspondant à l'absence d'aménagements. En effet, un rapport moyen de 1,05 existe entre le transport solide spécifique annuel à Tebaga 1 par rapport à Tebaga 3, mais, après aménagement, ce rapport n'est plus que de 0,26. Ce qui signifie qu'après aménagement le transport solide a subi une réduction de l'ordre de 79 %. Sur Tebaga 3, le transport solide diminue également très sensiblement après aménagement, passant de 1,6 tonne par hectare en 1988 à 0,032 tonne par hectare en 1992.

Dans le but de mieux visualiser le rôle des travaux anti-érosifs, nous avons représenté sur le graphique de la Figure 6, les variations du transport solide durant toute la période d'observation 1987-1993.

On peut noter qu'à partir de la quatrième année les valeurs de transport solide restent fortes sur Tebaga 2, alors qu'elles diminuent sensiblement sur le Tebaga 1 et Tebaga 3.

Ainsi, après aménagement des micro-bassins, le transport solide a subi une réduction de l'ordre de 79 %. Les particules transportées au cours des crues se trouvent piégées en amont des différents cordons et barrages en pierres sèches.

## Essai de modélisation du transport solide

Dans le but de déterminer les paramètres explicatifs du transport solide, en tenant compte des aménagements, et de proposer un modèle simple bâti sur une approche statistique, nous avons basé notre démarche sur l'analyse des corrélations multiples entre la variable à expliquer (transport solide) et les variables explicatives (pluie, débit,...).

Le transport solide nécessite comme toute action une source d'énergie. En ce qui concerne l'érosion hydrique, cela commence par la pluie et s'étend au ruissellement. Tous

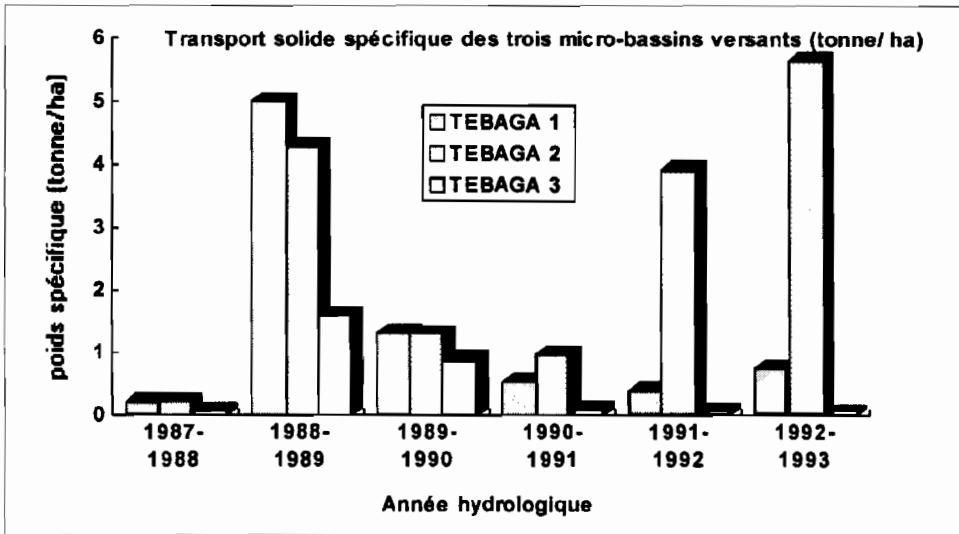


Figure 6. Transport solide spécifique des trois micro-bassins versants(tonne/ha).

les auteurs confirment que le facteur essentiel de l'érosion est la pluie [6-8]. L'énergie des gouttes de pluie désagrège les fines particules du sol qui peuvent ensuite être entraînées par le ruissellement.

Ce dernier mécanisme est observé sur les terrains de pentes moyennes ou plats [9], où s'observe un ruissellement en nappe. Très rapidement, surtout lorsque les pentes sont relativement fortes, se créent des rigoles puis des ravines où le rôle érosif du ruissellement peut devenir très important.

### Étude des corrélations multiples

Le phénomène de transport solide se manifeste lors d'un événement averse-crue, c'est-à-dire, lorsque la pluie engendre du ruissellement. Il est donc important de s'appuyer sur un certain nombre de paramètres définissant la séquence averse-crue.

Le traitement a été fait sur les données observées au niveau des micro-bassins versants de Tebaga 1 (avant et après aménagement) et Tebaga 2 (1987-1993). Pour ce dernier, la taille de l'échantillon est de 32 valeurs, tandis que, pour Tebaga 1, elle est de 16 avant aménagement et 19 après aménagement. Les événements analysés correspondent à ceux utilisés lors de l'étude des hydrogrammes de crues.

### Cas de Tebaga 1 avant aménagement

Dans un premier temps, nous avons procédé à une analyse de la matrice des corrélations partielles liant toutes les variables sélectionnées, afin d'analyser leur indépendance et d'évaluer le poids de chacune des variables explicatives dans la détermination de la variable à expliquer. Ensuite ont été testés plusieurs modèles de régressions multiples en utilisant comme critère de validation le coefficient de détermination et le graphique des résidus.

Le modèle retenu, dans le cas de Tebaga 1, est le suivant :

$$Pt = (50,29 + 0,18xQm + 126,19xLr^2 + 0,07xI30^3) - 1,32xI30^2$$

Avec Pt : poids du transport solide, en kg

Qm : débit maximal de crue, en l/s

Lr : hauteur de la lame ruisselée, en mm

I30 : intensité maximale en 30 minutes, en mm/h

Pour un nombre de 16 observations le coefficient de détermination est de 98 %, sachant toutefois que la lame ruisselée explique à elle seule 92 % de la variance du transport solide.

Le graphique des résidus confirme la qualité de la régression retenue (Figure 7).

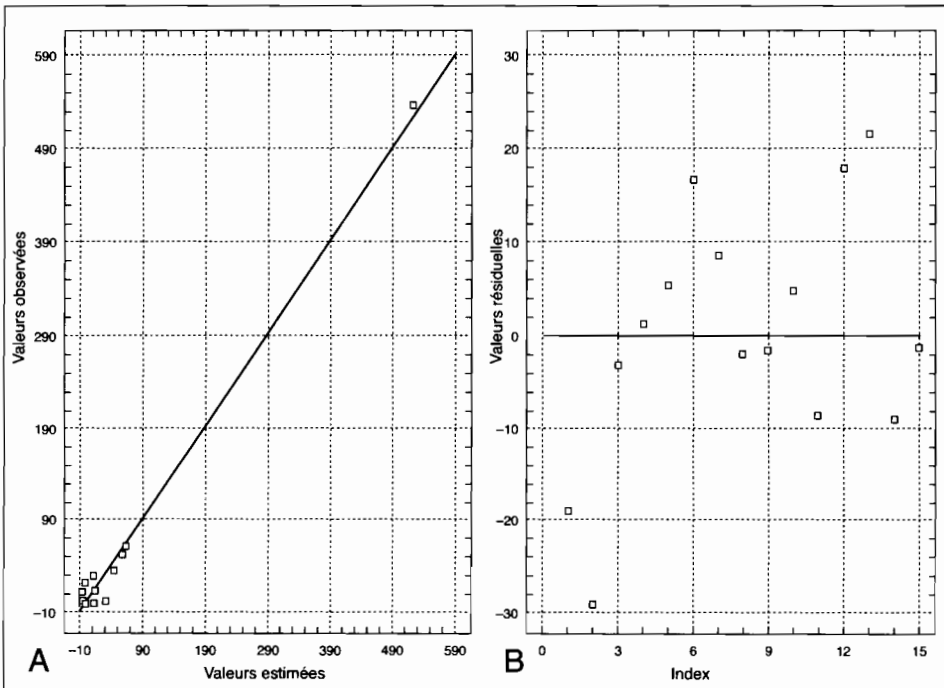
### Cas de Tebaga 1 après aménagement

En procédant de la même façon pour Tebaga 1 après aménagement, nous avons constaté que le débit maximum (Qm) était la variable explicative principale du transport solide, suivie de l'intensité, mais que la lame ruisselée n'avait aucune influence.

Le modèle retenu est le suivant :

$$Pt = (8,38xQm + 0,01xI30^3) - 0,14xI30^2$$

avec un coefficient de détermination de 97 % et un nombre d'observations de 19 (Figure 8).



**Figure 7.** Corrélation entre valeurs observées et valeurs estimées. **A.** Tebaga 1 avant aménagement. **B.** Graphique des résidus.

Le graphique des résidus montre bien une allure aléatoire, ce qui confirme la régression retenue (Figure 8).

### Cas de Tebaga 2 (non aménagé)

Pour le micro-bassin de Tebaga 2 (non aménagé), nous constatons que les variables les plus explicatives sont la lame ruisselée (Lr) et le débit maximum (Qm). Elles expliquent 98 % de la variance du transport solide.

Le modèle retenu est le suivant :

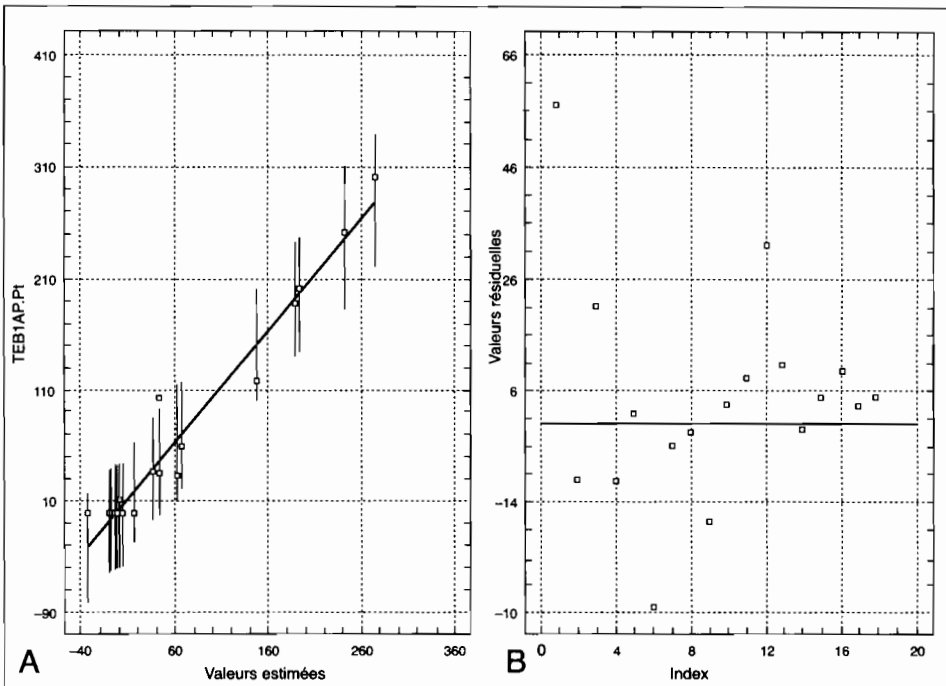
$$Pt = ( 5,96Qm + 21,8xLr^2 + 0,003xI30^3 ) - 0,1xI30^2$$

avec un coefficient de détermination de 98 % calé avec 32 valeurs.

Le graphique de la Figure 9 illustre la qualité du modèle.

### Interprétations

Pour les différents modèles proposés, la partie positive représente le poids des particules arrachées par splash ou par ruissellement, tandis que la partie négative représente la partie transportée qui s'est sans doute redéposée avant d'arriver à l'exutoire. Certes les modèles retenus semblent expliquer correctement les variations du transport solide,



**Figure 8.** Corrélation entre valeurs observées et valeurs estimées. **A.** Tebaga 1 après aménagement. **B.** Graphique des résidus.

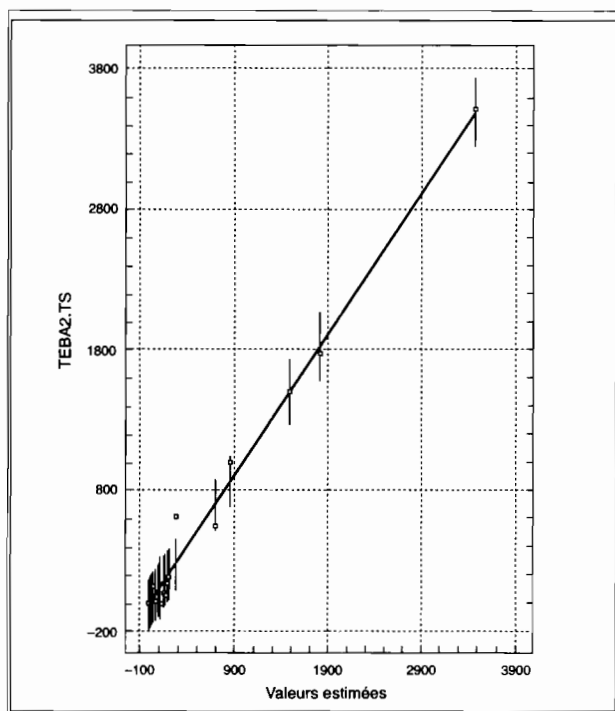


Figure 9. Valeurs observées et valeurs estimées (Tebaga 2)

cependant, il faudrait optimiser les paramètres des modèles ajustés empiriquement [10] et les valider. Il serait intéressant, de plus, de vérifier leur transposabilité à des bassins versants. Par ailleurs, on a constaté qu'avant aménagement des micro-bassins versants le paramètre qui explique le plus le transport solide est la lame ruisselée. Par contre, après aménagement, la lame ruisselée est remplacée par le débit maximum, en premier lieu, puis par l'intensité en 30 minutes, ce qui laisserait à penser que les plus forts débits jouent alors un rôle important, une partie du ruissellement restant peu actif.

Ceci peut s'expliquer par le fait que le ruissellement se trouve freiné par les différents traitements de conservation des eaux et du sol, sauf dans le cas de crues suffisamment fortes (débit et intensité importants).

Dans notre approche, nous n'avons pas inclus le couvert végétal du sol, qui joue un rôle important dans les phénomènes d'érosion hydrique. Il faut préciser que, sur les bassins étudiés, la végétation ne croît d'une manière significative que lors des années de bonne pluviosité. En règle générale, le sol est presque nu.

## Conclusion

La comparaison du comportement hydrologique et du transport solide observés sur les micro-bassins de Tebaga durant deux campagnes de mesures, avant traitement (1987-1990) et après traitement (1990-1993), nous a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- avant aménagement, l'hydrogramme (enveloppe et médian) de crue présente un seul pic avec un temps de montée très court, une phase de décrue rapide et un débit de pointe très important ;

- après aménagement, la forme de l'hydrogramme est plus étalée, le temps de réponse est beaucoup plus long avec surtout un temps de base plus important et un débit de pointe (Qm) réduit de 50 % ;

- diminution du volume ruisselé, évalué à près de 30 % ;

- diminution très nette du transport solide évalué à près de 80 %. Il reste à savoir si, au fil des années, ces travaux ne seront pas menacés d'envasement ;

- le transport solide pourrait être expliqué par la lame ruisselée, le débit maximum et l'intensité maximale de pluie en 30 minutes (I30). En effet, l'érosion hydrique observée est due essentiellement au détachement des particules du sol par les précipitations (Intensité) et le ruissellement, ce dernier étant lui même lié aux précipitations.

Certes, notre approche globale nous a permis de mettre en évidence l'impact des travaux anti-érosifs sur le ruissellement et l'érosion. Toutefois, une analyse par événement averse-crue devrait être envisagée afin de déterminer :

- la position de l'intensité maximale de l'averse ainsi que la forme et les caractéristiques du hétéogramme type ;

- la quantité de sédiments transportés par charriage redéposée au cours d'une averse.

## Références

1. Bergaoui M., Camus H. (1994). Étude statistique des averses sur le bassin versant de l'oued Ez-Zioud (Djebel Semmama, Tunisie centrale). *Les Annales Maghrébines de l'Ingénieur* ; 8(2) (19 p).
2. Joffre R. (1987). Notice des cartes de la végétation du bassin versant de l'oued El Hissiane. Centre ORSTOM, Tunis (16 p).
3. Camus H., *et al.* (1987). Rapport d'installation de 3 micro-bassins versants expérimentaux dans la région de Sbeitla pour l'évaluation de l'impact des travaux anti-érosifs de la CES. DGRE/ORSTOM/CES, Tunis (26 p).
4. Mouelhi S. (1993). Impact des travaux anti-érosifs. Micro-bassin de Tebaga. Stage d'été, juillet août 1993. ORSTOM-Tunis.
5. Roche M. (1963). *Hydrologie de surface*. Gauthier-Villars, Paris (424 p).
6. Wischmeir W.H., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning US. Departement of Agriculture. *Agriculture Handbook* n° 537 (58 p).
7. Henensal P. (1986). L'érosion externe des sols par l'eau. Approche quantitative et mécanismes. Rapport de recherche du Laboratoire des ponts et chaussées ; n° 138 (76 p).
8. Keith R., Cooley R. (1980). Erosivity values for individual desing storms. *J of Irr and Dra* ; vol. 106 (juin) : 135-145.
9. Ellison W.D. (1945). Two devices for measuring erosion. *Agr Engr* ; 25 : 53-55.
10. Rosenbrock H.H. (1960). An automatic method of finding the greatest of least value of function. *Computer J* ; Vol. 3 : 175-184.
11. Delhoume J.P., Barbery J. (1985). Étude en milieu méditerranéen semi-aride (Djebel Semmama). Ruissellement et érosion en zone montagneuse en Tunisie centrale. Résultats 1975-1978.