

Modélisation de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued M'Khachbia (Nord-Ouest de la Tunisie)

Modelling water erosion in M'Khachbia basin (North-West of Tunisia)

M. JAOUED*, M. GUEDDARI* et M. SAADAOUI**

Abstract : This study calls upon modelling of soil erosion by water to estimate the quantity of sediment carried in two sub-basins of the M'Khachbia river which flows directly in the Sidi Salem dam build on the Mejerda (North eastern Tunisian river). Results of calculations of water and sediment discharges obtained by application of the soil erosion model KINEROS were in agreement with observed data. The specific erosion recorded for the various events of each sub-basin outlet reached an average of 0,5 ton/ha. The results indicate that soil loss due to higher runoff rates increased with increasing of slope gradient. Sediment discharge is quite sensitive to hydrologic simulation, as the topography and the rain's intensity affecting the sediment transport capacity. Overall ability of the model to reproduce the measured data was considered relatively good.

Key words: Hydrologic modelling, water erosion, KINEROS, watershed, Tunisia.

Résumé : La modélisation de l'érosion hydrique est utilisée pour estimer la quantité des sédiments transportés, au cours des épisodes pluvieux, par les eaux de ruissellement de deux sous-bassins versants de l'oued M'Khachbia, situés en amont de la retenue du barrage Sidi Salem sur l'oued Mejerda (Nord-ouest de la Tunisie). L'application d'un modèle de ruissellement et d'érosion à paramètres physiques distribués (KINEROS), a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. L'érosion spécifique à l'exutoire de chaque sous-bassin versant atteint une moyenne de 0,5 tonne/ha. Les résultats indiquent une interdépendance entre le taux d'érosion spécifique et la pente des versants. La topographie, la nature du sol et l'intensité des pluies sont les principaux facteurs favorables à la production des matériaux solides et à leur livraison au cours d'eau.

Mots clés: Modélisation hydrologique, érosion hydrique, KINEROS, bassin versant, Tunisie.

INTRODUCTION

En Tunisie, l'irrégularité climatique, la torrencialité des écoulements, la faible densité du couvert végétal et la surexploitation des terres sont particulièrement favorables à l'accélération du phénomène de l'érosion hydrique qui menace gravement les potentialités en eau et en sols du pays. En effet, environ 325000 ha de sol sont fortement affectés par l'érosion et 986000 ha sont moyennement érodés (LAAJILI GHEZAL *et al.* 1998). Ces chiffres peuvent être vus à la hausse si on intègre la détérioration de la qualité chimique de nos sols dans les plaines et les périmètres irrigués, dont les effets ont pour conséquence l'augmentation de l'érosion hydrique aussi bien qu'éolienne.

En l'absence d'aménagement anti-érosif, les sédiments entraînés par les eaux de ruissellement atteignent les retenues des barrages. Ils provoquent ainsi leur envasement, limitent leur capacité de stockage et réduisent leur durée de vie. En moyenne 25,3 millions de m³ de sédiments se déposent chaque année dans les retenues des barrages. Devant l'irrégularité et la complexité des processus d'érosion-transport-sédimentation et en vue d'une gestion

* Laboratoire de Géochimie et de Géologie de l'Environnement, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Campus universitaire, 1060 Tunis, Tunisie.

** Direction Générale de Ressources en Eaux, Ministère de l'Agriculture, Tunis, Tunisie

rationnelle des ressources en eau et en sol, la modélisation, comme outil d'étude et d'aide à la décision est devenue nécessaire.

Le but principal de cette étude est de modéliser le transport liquide et solide à l'issue des événements pluvieux dans deux sous bassins versants de l'oued M'Khachbia : Bazina et M'Khachbia amont, ayant chacun une superficie de 18 km². Les plans topographiques (carte 1/25000, n°18), édaphiques (caractérisation des états de surface, analyses physico-chimiques) et végétatifs (type de végétation, recouvrement), ont été utilisés pour caractériser les milieux étudiés. Les données pluviographiques, hydrologiques et sédimentologiques mesurées et collectées au niveau des stations hydrométriques sur un épisode allant de 1985 à 1987, ont été analysées. Toutes ces informations nous ont permis l'application du modèle de ruissellement et d'érosion KINEROS (WOOLHISER *et al.* 1990).

CARACTERISTIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Cette étude est réalisée au niveau du bassin versant de l'oued M'Khachbia situé au Nord-Ouest de la Tunisie (Fig. 1), dont la superficie est de 106 km². Le climat est de type semi-aride à hiver doux et la pluviométrie se caractérise par une irrégularité saisonnière. Les mois de décembre et janvier sont les plus pluvieux avec 200 mm en moyenne, tandis qu'en été, le maximum des pluies ne dépasse pas 25 mm.

Ce bassin est caractérisé par une forte pente, surtout dans les jebels et les collines où elle dépasse 30 %. Les principaux affleurements sont formés de calcaires, d'argiles et des marnes. Le réseau hydrographique est établi sur les marnes. Les unités pédologiques les plus abondantes sont formées par des sols d'érosion, vertiques et calcimorphes. Les grandes cultures annuelles mécanisées occupent la majeure partie du bassin (BANNOUR, 1984).

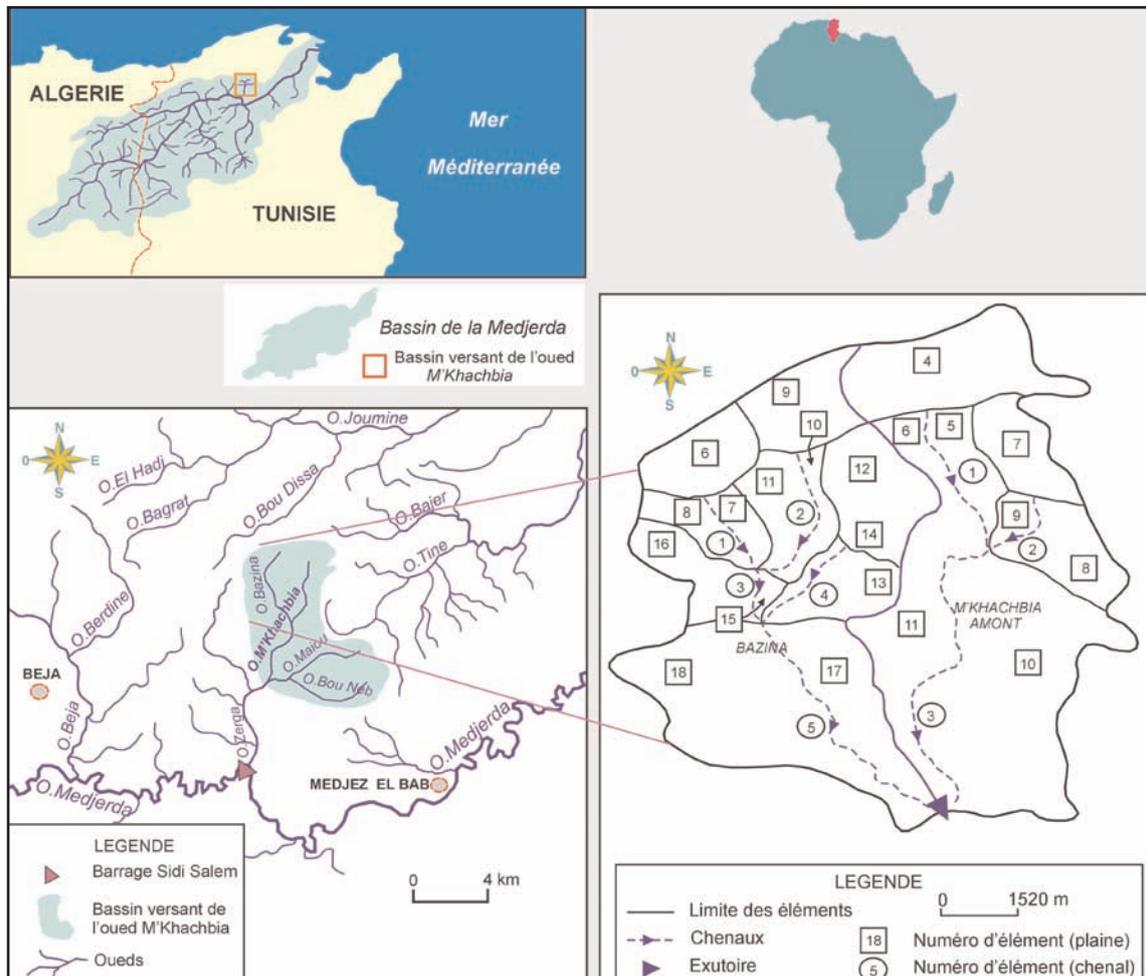


Fig.1: localisation et subdivision du bassin versant de M'Khachbia en plaines et chenaux.

MODELISATION DE L'EROSION HYDRIQUE

Pour modéliser l'érosion, nous avons utilisé le modèle « KINEROS » KINematic Runoff and EROSION (WOOLHISER *et al.* 1990). Il s'agit d'un modèle mathématique distribué à base physique, orienté pour les épisodes pluvieux, décrivant les processus d'interception, d'infiltration, de ruissellement et d'érosion à partir de petits bassins versants agricoles et urbains durant un événement pluvieux. Ces bassins sont représentés par une cascade des plaines et des chenaux. Le modèle utilise l'approximation de l'onde cinématique pour l'écoulement de surface et dans les chenaux et suppose que le ruissellement est généré par un mécanisme « type Horton ». La description de l'infiltration se base sur l'équation de SMITH et PARLANGE (1978). Il peut être utilisé pour déterminer l'impact des aménagements dans le bassin versant (développement urbain, petits réservoirs, canaux aménagés) sur les hydrogrammes des crues et la production des sédiments.

ESTIMATION DES PARAMETRES

Sélection des plaines et des chenaux

L'objectif de la sélection des plaines et des chenaux est de préserver une bonne signification de la variation spatiale de la topographie, des sols, du couvert végétal et de la précipitation. A partir de la carte topographique (1/25 000, Béja: n°18), en tenant compte du relief, nous avons subdivisé la zone d'étude en deux sous-bassins versants : Bazina et M'Khachbia amont en éléments (plaines et chenaux), qui sont présentés en cascades de l'amont vers l'aval (Fig. 1). Pour ces derniers, nous avons également déterminé les caractéristiques physiques (longueur, largeur, pente...).

Tableau I: Principaux paramètres caractérisant les sols.

<i>Paramètres</i>	<i>Sous bassin-versant BAZINA</i>		<i>Sous bassin-versant M'KHACHBIA AMONT</i>
ϕ ou POR (m^3/m^3)	0,490		0,398
S_i	0,27		0,20
S_{max}	0,75		0,83
<i>n Manning</i>	Chenaux	0,15	0,15
	Plaines	0,09	0,09
<i>FMIN</i> (mm/h)	Chenaux	0,021	0,07
	Plaines	0,023	0,08
<i>DINTR</i> ou <i>I</i> (mm)	Chenaux	4	4
	Plaines	11	11
<i>RECS</i> (mm)	2		2

Paramètres d'infiltration

Les principaux paramètres d'infiltration sont : le coefficient de rugosité de Manning (n), la porosité totale du sol (ϕ), la saturation initiale du sol (S_i), la saturation maximale du sol (S_{max}), la conductivité hydraulique à saturation effective (FMIN), la hauteur d'interception (DINTR) et le facteur de récession (RECS). L'estimation de ces paramètres a été faite à partir des analyses des sols effectuées sur les deux sous-bassins versants et au laboratoire (Tableau I).

Paramètres de l'érosion

L'équation générale utilisée dans le modèle pour prédire la dynamique des sédiments à un point donné du bassin et le bilan de masse est similaire à l'équation de l'écoulement de l'eau (BENNET, 1974):

$$\delta(AC_s)/\delta t + \delta(QC_s)/\delta x - e(x,t) = q_s(x,t)$$

où: C_s = concentration de sédiments;
A = section du lit;
Q = débit de l'eau;
e = taux d'érosion;
 q_s = vitesse du transport latéral par unité de largeur.

Pour les parcelles en amont, le paramètre (e) représente: l'érosion de splash (g_s) qui dépend de l'intensité de pluie et l'érosion hydraulique (g_h) qui dépend du ruissellement. En d'autres termes, le paramètre (e) représente la somme du détachement des particules du sol et leur déposition: $e = g_s + g_h$

* *Paramètres de l'érosion de splash*: les paramètres C_f de l'érosion de splash et C_h de l'humidification, contrôlent le taux de perte des sols produit par l'énergie des gouttes de pluie ainsi que le transport des sédiments.

- le paramètre C_f est obtenu à partir de la relation suivante: $C_f = 422 \times K_{USLE} \times (\phi f) = 105,5$ où ϕf est le facteur de réduction de l'érosion de splash qui dépend du paillage (sol protégé par les pailles). On estime que les pratiques d'aménagement sont inexistantes dans les deux sous-bassins et par conséquent, $\phi f = 1$ et $K_{USLE} = 0,25$ (facteur d'érodibilité du sol) est calculé à partir des valeurs de la texture du sol se trouvant dans le monographe de WISCHMEIER et SMITH (1978).

-Le paramètre d'humidification de l'érosion de splash (C_h) contrôle l'effet d'une lame d'eau sur le détachement des particules de sédiments produit par les gouttes de pluie. Après la formation d'une lame d'eau, l'érosion de splash est absorbée par l'énergie cinématique des gouttes de pluie et l'importance de la réduction varie directement avec la hauteur de la lame d'eau (MUTCHLER et LARSON, 1971; SCHULTZ *et al.* 1985). Le paramètre C_h est déterminé comme suit: $C_h = 2/d_r$; avec d_r étant le diamètre des gouttes de pluie. On admet que $d_r = 3$ mm et $C_h = 203$.

* *Paramètre de l'érosion hydraulique*: le coefficient de l'érosion hydraulique (C_G) dépend de K_{USLE} et de la fraction argileuse dans le sol (f_{cl}):

$$C_G = 5,6 K_{USLE} \times \phi_r / a_T \text{ avec } \begin{array}{ll} a_T = 188K_{USLE} - 468f_{cl} + 907f_{cl}^2 & \text{si } f_{cl} \leq 0,22 \\ a_T = 130 & \text{si } f_{cl} > 0,22 \end{array}$$

et ϕ_r : facteur de résistance pour l'érosion hydraulique qui est due au paillage.

On admet donc que $\phi_r = 1$ étant donné que les agriculteurs n'utilisent pas la technique de paillis. En plus, la fraction d'argile f_{cl} est supérieure à 0,22, donc $a_T = 130$, $K_{USLE} = 0,25$ et $C_G = 0,011$.

Choix des relations du transport solide

Concernant la capacité de transport, le modèle KINEROS fixe le choix de six relations de transport en fonction du diamètre moyen des particules de sédiments (D50) (WOOLHISER *et al.* 1990), en se basant sur les travaux de ALONSO *et al.* (1981); JULIEN et SIMON (1985). Dans cette étude, notre choix a porté sur la relation de YANG (1973) pour tous les chenaux, d'une part, et la relation de ENGLAND et HANSEN (1967) pour toutes les plaines d'autre part, et ceci à la suite de plusieurs essais pour tous les évènements.

CALAGE DU MODELE

Le calage du modèle KINEROS, a été effectué sur quatre évènements "averse-crue-transport solide" observés les 29/10/1985, 29/10/1986, 17/01/1987 et 13/02/1987.

Après plusieurs essais d'application, les trois paramètres les plus sensibles ont été déterminés: la conductivité hydraulique de saturation (FMIN), la porosité du sol (POR) et la saturation initiale du sol (SI). Les valeurs calculées de ces trois paramètres permettant de reproduire au mieux les hydrogrammes et les turbidigrammes observés, ont été déterminées à la suite de plusieurs essais en utilisant des valeurs arbitraires (Tableau II).

Bien que nous disposons des données de concentration de matières solides en suspension, l'évaluation des débits solides totaux ne peut être qu'approximative, étant donné l'absence des données sur le charriage du fond. En effet, pour avoir le transport solide total, on a ajouté aux valeurs mesurées le charriage du fond qui est estimé à environ 20 % du transport en suspension (CLAUDE et CHARTIER, 1975).

Tableau II: Paramètres caractérisants les sols

<i>Paramètres</i>	<i>Sous bassin- versant BAZINA</i>		<i>Sous bassin-versant M'KHACHBIA AMONT</i>
	Chenaux		
<i>FMIN</i> (mm/h)		0,035	0,07
	Plaines	0,036	0,08
<i>φ</i> ou <i>POR</i> (m ³ /m ³)		0,490	0,398
<i>S_I</i>		0,27	0,25
<i>Q_{LmaxObs}</i> (m ³ /s)		33	31,5
<i>Q_{LmaxCal}</i> (m ³ /s)		30	28

RESULTATS ET DISCUSSION

Le modèle a donné des résultats satisfaisants étant donné que la moyenne des erreurs n'a pas dépassé 11% pour les débits de pointe liquides et 4% pour les débits de pointe solides dans le sous-bassin de Bazina. Dans le sous-bassin de M'Khachbia amont, la moyenne des erreurs n'a pas dépassé 15% et 7%, respectivement, pour les débits de pointe liquides et solides (Tableaux III et IV). La comparaison des débits de pointe des hydrogrammes et des turbidigrammes de crues observées et calculées, a permis de visualiser la qualité du calage du modèle (Fig. 2 et 3).

L'observation sur le terrain montre que les deux sous-bassins sont soumis à une érosion intense où prédominent les mouvements en masse et les ravinements. Là où l'érosion apparaît peu importante, elle peut être insidieuse car, la plupart du temps, elle est masquée par les labours et les travaux de préparation du sol.

Tableau III: Résultats du calage du modèle pour les différents événements observés dans le sous-bassin Bazina

Événements	$Q_{Lmax}Obs$ (m^3/s)	$Q_{Lmax}Cal$ (m^3/s)	Erreurs	$Q_{Smax}Obs$ (corrigé) (Kg/s)	$Q_{Smax}Cal$ (Kg/s)	Erreurs
29/10/1985	33	30	9%	76,8	74	3,6%
29/10/1986	2	1,8	10%	26	25	3,8%
17/01/1987	27,5	22	20%	252,2	241	4,4%
13/02/1987	34,6	36,4	5,2%	223,2	216	3,2%

Tableau IV: Résultats du calage du modèle pour les différents événements observés dans le sous-bassin M'Khachbia amont.

Événements	$Q_{Lmax}Obs$ (m^3/s)	$Q_{Lmax}Cal$ (m^3/s)	Erreurs	$Q_{Smax}Obs$ (corrigé) (Kg/s)	$Q_{Smax}Cal$ (Kg/s)	Erreurs
29/10/1985	31,5	28	11,1%	64,6	73	13%
29/10/1986	2,5	2,45	2%	76,6	83	8,3%
17/01/1987	8,7	8	8%	248,8	244	1,9%
13/02/1987	10	13,8	38%	99	95	4%

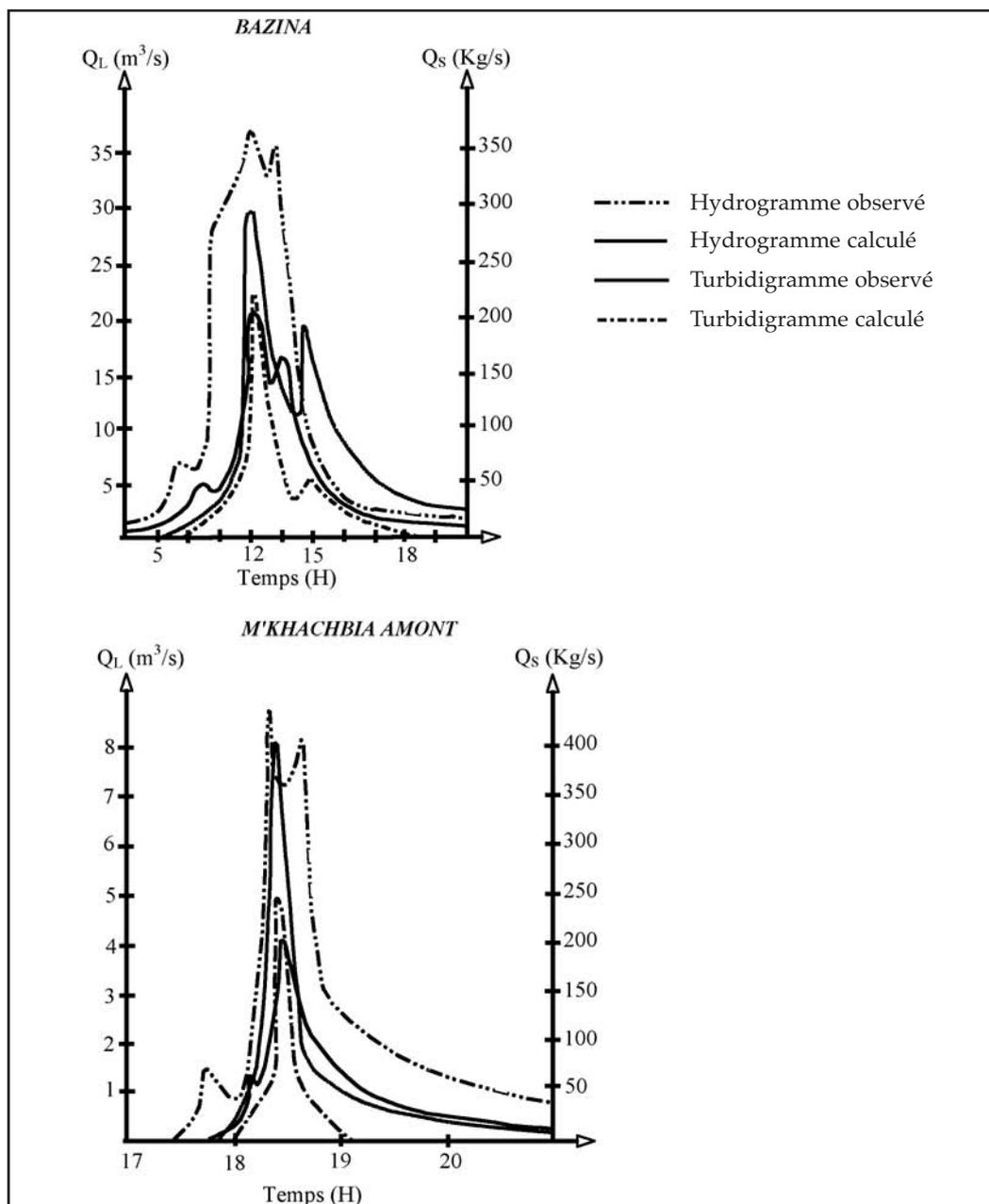


Fig. 2: Représentation des débits de pointe des hydrogrammes et des turbidigrammes observés et calculés (Evenement du 17/01/1987).

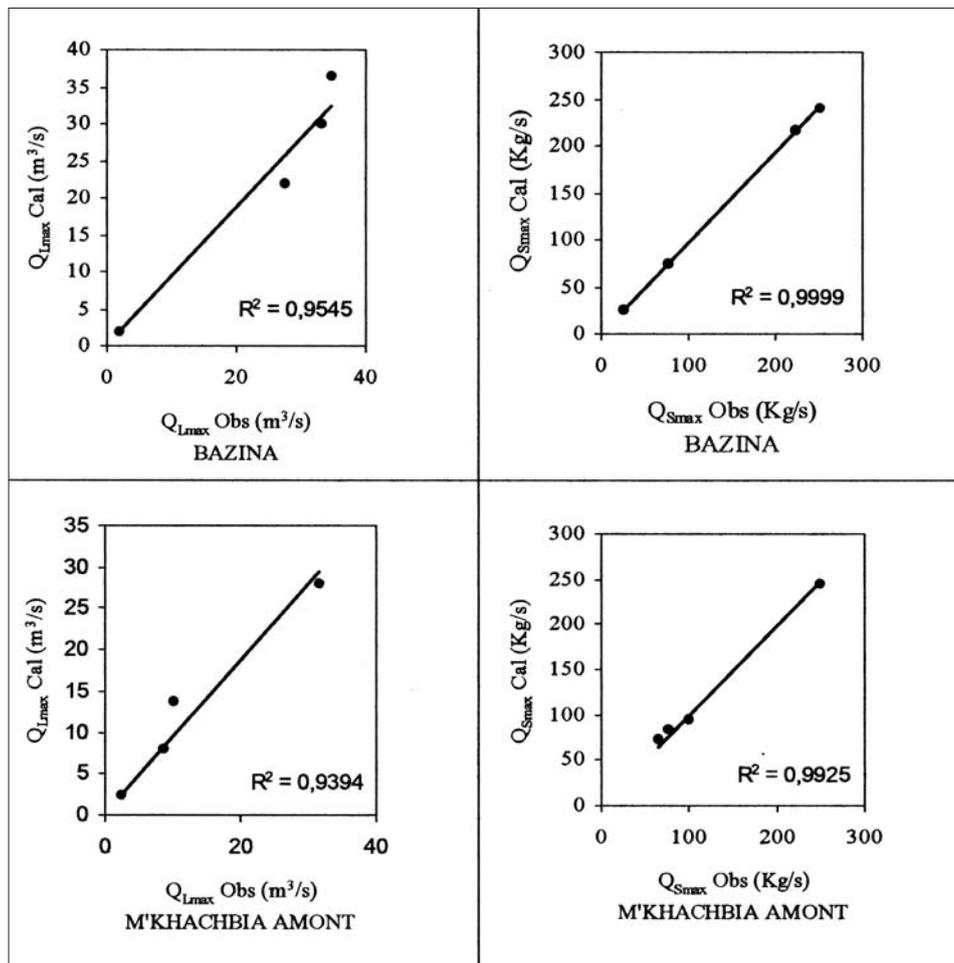


Fig. 3: Représentation des débits de pointe des hydrogrammes et turbidigrammes observés en fonction de ceux calculés pour les différents évènements.

En effet, les facteurs les plus significatifs à l'échelle du bassin versant sont:

- *La lithologie*: les formations dominantes (Crétacé supérieur) qui sont constituées essentiellement par une alternance des couches tendres, imperméables et très peu résistantes à l'érosion (argiles et marnes) et des bancs plus durs (calcaires), ce qui explique donc l'importance du taux de sédiments transportés. Cependant, les terrains marneux forment un domaine sur lequel l'érosion par entailles linéaires se termine souvent par des ravines hiérarchisées et des "bad-lands".

- *Effet de la pente*: pour les deux sous-bassins d'étude et au niveau des plaines, on note une prédominance des pentes modérées tandis que les pentes élevées sont localisées et correspondent aux affleurements calcaires. Pour tous les événements, les résultats obtenus tant sous pluies naturelles que simulées sont globalement concordants. Les graphiques de la figure 4 présentent une répartition linéaire de points, ce qui montre que l'érosion spécifique augmente significativement avec la pente. Cette tendance a été démontrée par plusieurs auteurs (WISCHMEIER *et al.* 1958; LOCH, 1984; MAH *et al.* 1992; HUANG, 1995). Les auteurs attribuent une telle relation (i) à la nature du sol; (ii) à la vitesse de l'écoulement; (iii) aux caractéristiques des pluies et de la croûte de surface (CHAPLOT *et al.* 1996).

Pour les différents événements étudiés, on observe au niveau de la majorité des plaines ayant des pentes modérées à fortes (Plaines 8, 9, 17 et 18, dans le sous-bassin Bazina et les plaines 4, 5, 10 et 11, dans le sous-bassin M'Khachbia), des transports de sédiments résultant essentiellement de l'érosion hydraulique, alors que l'érosion de splash n'est présente qu'au niveau des plaines à faible pente.

Les événements localisés de type orageux, caractérisés par de fortes intensités atteignant parfois des valeurs supérieures à 100 mm/h calculées sur une durée de 5 minutes, produisent des taux importants de transports solides (Tableau 5).

L'érosion spécifique enregistrée pour les différents événements à l'exutoire de chaque sous-bassin varie de 0,03 à 1,03 Tonnes/ha, avec une moyenne de 0,5 T/ha.

Tableau V: Transport solide et érosion spécifique calculée à l'exutoire de deux sous bassins

Événements	I _{max} (mm/h)	Transport solide (Tonnes)		Érosion spécifique (T/ha)	
		Bazina	M'Khachbia amont	Bazina	M'Khachbia amont
29/10/1985	59 (10 mn)	936,85	1163,497	0,50	0,63
29/10/1986	30 (5 mn)	54,594	378,611	0,03	0,20
17/01/1987	29 (10 mn)	1662,301	760,687	0,90	0,41
13/02/1987	156 (5 mn)	1921,786	467,107	1,03	0,25

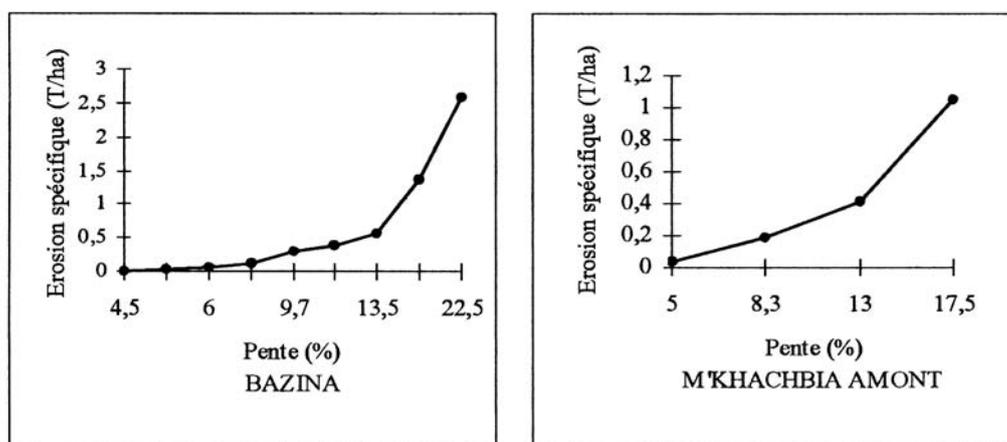


Fig. 4: Variation de l'érosion en fonction de la pente dans les deux sous - bassins versants (Événement du 29/10/1985).

CONCLUSION

L'érosion hydrique prise comme processus naturel constitue la première cause de dégradation des terres agricoles du pays. C'est pourquoi il est nécessaire de prendre des mesures correctives avant que les sols ne deviennent infertiles.

L'utilisation, à l'échelle du bassin versant, d'un modèle de ruissellement et d'érosion à paramètres physiques distribués, peut améliorer la compréhension de la variabilité des facteurs responsables des pertes de sol et ainsi solutionner les problèmes liés à la conservation des sols.

La modélisation des événements averses - crues - érosion dans les deux sous-bassins de l'Oued M'Khachbia a permis de montrer certains aspects opérationnels du modèle de ruissellement et d'érosion KINEROS.

En effet, les facteurs de l'érosion les plus significatifs à l'échelle de la zone d'étude sont la lithologie, la pente et les fortes intensités des pluies. La majorité des plaines sont affectées par l'érosion hydraulique, tandis que l'érosion de splash affecte seulement quelques plaines à faible pente. Les transports solides sont conditionnés par les averses-crues. Les dégradations spécifiques sont importantes pour les événements exceptionnels comme celui du 13/02/1987, qui s'élèvent à 1,03 t/ha. Ce sont les débits maximums les plus élevés qui engendrent les plus grands transports solides spécifiques.

La calibration et la validation du modèle, méritent d'être affinées par l'apport de plus de données climatiques et l'utilisation de différents scénarios aux facteurs non standards, tel que les facteurs d'occupation du sol ou des pratiques culturales, pour prédire l'impact de la variation combinée de tous les facteurs sur la stabilité du bassin versant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALONSO, C.V., NEIBLING W.H. and FOSTER G.R., 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modelling. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 24(5): 1211-1226.
- BANNOUR, H., 1984. Cartographie de l'érosion potentielle de l'oued M'Khachbia. Direction des sols; DGRE, Tunis, 9p + annexe.
- BENNET, J.P. 1974. Concepts of mathematical modelling of sediment yield. *Water Resources Research*, 10(3): 485-492.
- CHAPLOT, V., LE BISSONNAIS, Y., BENKHADRA, H., LE COMPTE, V. et FOX, D., 1996. Relation au champ entre pertes en terre et inclinaison de la pente en situation d'érosion diffuse. 10 p.
- CLAUDE, J. et CHARTIER, R., 1975. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie. DRE / ORSTOM (campagne 1975).
- ENGELUND, F. and HANSEN, E., 1967. A monograph on sediment transport in alluvial streams. Teknisk Vorlag, Copenhagen, 62p.
- HUNG, C., 1995 - Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interill areas. *Soil Sc. Soc., Am. J.*, 59: 982-990.
- JULIEN, P.Y. and SIMONS, D.B., 1985. Sediment transport capacity of overland flow. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 28(3): 755-761.
- LAAGILI GHEZAL, L., ALOUI, T., BEJI, M.A. et ZEKRI, S., 1998. Optimization of soil and water conservation techniques in watershed of Tunisian semi-arid region. *Advance in GeoEcology*, 31: 341-354, CATENA VERLAG.
- LOCH, R.T., 1984. Field rainfall simulator studies on two clay soils of the Darling Downs, Queensland III. An evaluation of current methods for deriving soil erodibilities (K factors). *Aust. J. Soil Res.*, 22: 401-412.
- MAH, M.G.C., DOUGLA, L.A. and RINGROSE-VOASE, A.J., 1992. Effects of crust development and surface slope on erosion by rainfall. *Soil Science.*, 154: 37-43.
- MUTCHLER, C.K. and LARSON, C.L., 1971. Splash amounts from waterdrop impact on a smooth surface. *Water Resources Research*, 7(1): 195-200.
- SCHULZ, J.P., JARRET, A.R. and HOOVER, J.R., 1985. Detachment and splash of cohesive soil by rainfall. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers*, 28(6): 1878-1884.
- SMITH, R.E. and PARLANGE, J.Y., 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resources Research*, 14(3): 533-538.
- TRIKI, F., 1986. Contribution à l'étude du transport solide sur le bassin versant de M'Khachbia. Mem. fin d'étude, INAT, 150p.
- WISCHMEIER W.H. and SMITH, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture Handbook 537, 58p.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. and UHLAND, R.E., 1958. Evaluation factors in the soil-loss equation. *Agric. Eng.*, 39: 458-462.
- WOOLHISER, D.A., SMITH, D.R.E. and GOODRICH, D.C., 1990. KINEROS: "A Kinematic Runoff and Erosion Model": Documentation and User Manuel. USDepartment of Agriculture, Agriculture Research Service. ARS-77, 130p.
- YANG, C.T., 1973. Incipient motion and sediment transport. Journal of Hydraulics Division. *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, 99(HY10): 1679-1704.

