

Utilisation du modèle KINEROS pour la simulation des hydrogrammes et des turbidigrammes en zone semi-aride tunisienne

Use of the KINEROS model for predicting runoff and erosion in a tunisian semi-arid region

L. Lajili-Ghezal

Volume 17, numéro 2, 2004

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705532ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705532ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Lajili-Ghezal, L. (2004). Utilisation du modèle KINEROS pour la simulation des hydrogrammes et des turbidigrammes en zone semi-aride tunisienne. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 17(2), 227–244. <https://doi.org/10.7202/705532ar>

Résumé de l'article

L'article qui est proposé s'inscrit dans le cadre de la recherche de systèmes de gestion de l'eau qui soient en mesure de satisfaire une demande alimentaire croissante dans un contexte de rareté de l'eau, tout en respectant les exigences de l'environnement. Il développe la phase 1 d'une démarche méthodologique visant l'élaboration d'un plan de gestion des eaux d'un lac collinaire en zone semi-aride tunisienne pour un développement agricole durable. Cette phase correspond à l'utilisation d'un modèle de prévision du ruissellement et des sédiments par averse. Le modèle mathématique à paramètres physiques distribués KINEROS est utilisé et appliqué sur un petit bassin versant de 135,35 ha pour 9 averses enregistrées durant les deux années 1997 et 1998 en affectant aux différents paramètres du modèle des valeurs réalistes basées sur les résultats expérimentaux collectés dans la littérature.

L'application de ce type de modèle nécessite la connaissance de l'occupation du sol à un instant donné. Pour ce faire, une carte d'aménagement agricole pour l'ensemble du bassin versant a été établie correspondant à la résultante de deux cartes élaborées ; la carte culturelle et la carte d'aménagement antiérosif.

L'analyse des résultats obtenus a montré que le modèle KINEROS peut être utilisé comme outil d'aide à la gestion des terres et des sols en zone semi-aride tunisienne à relief accidenté.

Utilisation du modèle KINEROS pour la simulation des hydrogrammes et des turbidigrammes en zone semi-aride tunisienne

Use of the KINEROS model for predicting runoff and erosion in a tunisian semi-arid region

L. LAJILI-GHEZAL

Reçu le 19 septembre 2002, accepté le 20 mai 2003*.

SUMMARY

The process of erosion-sedimentation is initiated by rainfall and runoff from hill slopes and channels. Runoff is considered as a transport vector, which is related to agricultural management systems and land use. To simulate and predict the behaviour of ungauged watersheds, distributed parameter models are of great interest. Among the different developed models, conceptual and physically-based models are interesting to investigate, specifically under semi-arid conditions. As reported by many authors, these models allow reliable evaluation of the hydrologic responses to land use changes and thus can be used for elaboration of water and soil conservation plans. The accuracy of erosion and sedimentation results is related to the quality of the hydrologic component. An appropriate way of studying soil erosion is through the formulation of the fundamental transport equations of water and sediment using the kinematic wave simplification. In this context, the KINEROS model is used. This paper deals with water management systems, which are able to satisfy an increasing food supply requirement within a context of water scarcity while respecting environmental requirements. It develops the first phase of a methodological approach for the establishment of a management plan for water stored in a small dam for a sustainable agricultural management.

This phase was elaborated and applied to the M'Richet El Anze watershed in a Tunisian semi-arid area using the following approach. A study of the hydrological and sedimentological performances of the KINEROS model using a set of hydrological and sedimentological data measured at a hydrologic station for a sub-catchment of 40 ha of the M'Richet El Anze watershed during the period September 1994 – March 1996. Flow has been measured since 1994 at a hydrometric station with a rectangular channel

Enseignante-Chercheur à l'École Supérieure d'Agriculture de Mograne, tél. : 216(72)660283, fax : 216(72)660563. Adresse : 1121 Mograne, Zaghwen, Tunisie.

Correspondance. E-mail : ghezal.lamia@iresa.agrinet.tn et lamia_lajili@yahoo.fr

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 2004.

(9.3 m × 1.2 m × 1.5 m in height, with an average slope of 2.5%). A limni-graph (OTT X) and a triangular flume, situated at the end of the channel, were used to measure the flow rate with a time step of 10 min. Sediment load was measured by taking manual samples with 1 L bottles during flow events at non-regular times. Sediment deposited in the artificial channel was weighed after the runoff event. Rainfall was measured with a time step of 5 min using two gauges situated within the watershed. Input data files were elaborated using: (1) a topographic map for watershed discretisation, slope and size planes; (2) soil sampling for soil characteristics and parameters; and (3) land surface and vegetation status maps of the watershed and photos on parcels corresponding to different periods of each year for land use and surface information parameters.

The KINEROS model was used to predict runoff and sediment loads for a small dam in the M'Richet El Anze watershed using an elaborate agricultural management map, which is the product of a crop map and a water and soil conservation map. Elaboration of the crop map was based on three criteria: soil texture, depth and rock cover, whereas the water and soil conservation management map was based on two criteria: land slope and soil rock cover. The rainfall data used for the runoff and sediment simulation were measured for the period 1997-1998 and only rainfall-generated runoff at the hydrologic station was considered. Characterization of rainfall erosivity was applied for different rainstorms, using the empirical erosivity index EI. The maximum erosivity was obtained for the 1998-09-25 rainstorm (39.4 K.J.mm/m².h). Results showed that autumnal rainfalls were the most aggressive events affecting soil erosion in the Tunisian semi-arid region, especially those in September and October. We also noted an important rainfall erosivity index for June with an orographic rainstorm (30.1K.J.mm/m².h). Related to these results, runoff seems to be related to rainstorm erosivity and soil moisture. Erosivity can affect soil structure while soil moisture involves an infiltration component, and both affect soil hydraulic conductivity. In this context, analyzing runoff-rainstorm events within a watershed and relating them to the rainfall erosivity index allowed runoff modeling, which can be done with more results. As developed by the author in 1988 for a small watershed in a Tunisian semi-arid region, a boundary intensity (IL) can be identified that is related to an antecedent soil moisture index (IPA). Related to the same work, runoff generation is defined when a pounded rainfall (PI) is anticipated. The difference between total and pounded rainfall correspond to excess rainfall. The PI is related to antecedent soil moisture index (IPA) and the boundary intensity (IL). These results showed the importance of the hydrologic component of the model and especially infiltration modeling. Thus, accuracy of erosion data is related to the precision of the hydrological results.

The following can be concluded from the application of the KINEROS model:

- 1 – The KINEROS model can be used for predicting runoff from ungauged watersheds and for evaluating future land use master-plans for Tunisian semi-arid high lands;
- 2 – Best runoff simulations were obtained for rainstorms that lasted less than one hour, with high intensity and a total rain of more than 20 mm;
- 3 – The accuracy of erosion results was related to the hydrological component and precision of parameters assessment;
- 4 – For runoff forecasts in the small dam of M'Richet El Anze, the small amount and the irregularity of runoff prompt the use of collected water for extra irrigation of crops and vegetation tolerant to water stress;
- 5 – Development of annual crops would increase the efficiency of autumnal runoff ;

6 – Irrigation duty duration from the small dam was related to the extent of water erosion and sediment deposition, which were related to runoff and topography;

7 – The developed methodology used for the application of the KINEROS model to predict the impact of water and soil conservation management on a Tunisian semi-arid watershed without calibration is interesting, especially because it allows the elaboration of distributed soil parameters and crop maps, which can be used as a decision support system for erosion control on hill slopes, keeping dams located downstream in good working order.

Key words: *resources management, model, physically-distributed parameters, agricultural map, rainstorms, runoff, sediments.*

RÉSUMÉ

L'article qui est proposé s'inscrit dans le cadre de la recherche de systèmes de gestion de l'eau qui soient en mesure de satisfaire une demande alimentaire croissante dans un contexte de rareté de l'eau, tout en respectant les exigences de l'environnement. Il développe la phase 1 d'une démarche méthodologique visant l'élaboration d'un plan de gestion des eaux d'un lac collinaire en zone semi-aride tunisienne pour un développement agricole durable. Cette phase correspond à l'utilisation d'un modèle de prévision du ruissellement et des sédiments par averse. Le modèle mathématique à paramètres physiques distribués KINEROS est utilisé et appliqué sur un petit bassin versant de 135,35 ha pour 9 averses enregistrées durant les deux années 1997 et 1998 en affectant aux différents paramètres du modèle des valeurs réalistes basées sur les résultats expérimentaux collectés dans la littérature.

L'application de ce type de modèle nécessite la connaissance de l'occupation du sol à un instant donné. Pour ce faire, une carte d'aménagement agricole pour l'ensemble du bassin versant a été établie correspondant à la résultante de deux cartes élaborées ; la carte culturale et la carte d'aménagement anti-érosif. L'analyse des résultats obtenus a montré que le modèle KINEROS peut être utilisé comme outil d'aide à la gestion des terres et des sols en zone semi-aride tunisienne à relief accidenté.

Mots clés : *gestion des ressources, modèle, paramètres physiques distribués, carte agricole, averses, ruissellement, sédiments.*

1 – INTRODUCTION

La zone semi-aride tunisienne est caractérisée par des pluviométries moyennes annuelles comprises entre 600 et 300 mm et des évapotranspirations potentielles annuelles variant entre 1100 et 1500 mm. Toutefois, une forte variabilité inter annuelle et intra annuelle caractérise ces zones. Cette irrégularité spatio-temporelle des pluies est associée à une agressivité qui favorise le ruissellement et l'érosion hydrique. Ces caractéristiques climatiques nous incitent à pratiquer une agriculture pluviale associée à des techniques de conservation des eaux et des sols, et une agriculture en irriguée dans les endroits dotés d'une ressource hydrique.

Les lacs collinaires constituent une composante importante de la stratégie nationale de la Direction de la Conservation des Eaux et des Sols et du plan décennal de la mobilisation des ressources en eau du Ministère de l'Agriculture en Tunisie pour la période 1990-2000. Parmi les avantages de ces lacs, leurs contributions au développement durable de milieux naturels dégradés et fragiles et ce à travers une meilleure utilisation des ressources sol et eau. Toutefois, le rôle que peuvent jouer ces petits barrages dans le contrôle de l'érosion hydrique et le bon fonctionnement des barrages situés en aval de ces ouvrages de petite hydraulique, ne peut être mis en évidence qu'à travers le recours à des modèles hydrologiques et sédimentologiques de simulation et de prévision.

L'eau de ruissellement est considérée comme un vecteur de transport, dont l'intensité est liée aux systèmes de gestion agricole et d'utilisation des terres. Ainsi, pour la simulation et la prévision du comportement des bassins versants non jaugés, les modèles à paramètres distribués sont d'un grand intérêt. Parmi les modèles développés, ceux qui sont conceptuels et basés sur des concepts physiques d'écoulement et de transport, sont intéressants à étudier en particulier en conditions semi-arides, où l'érosion hydrique est très active affectant considérablement la durabilité de l'agriculture et la protection de l'environnement. Comme reporté par plusieurs auteurs, ces modèles distribués permettent une bonne estimation des réponses hydrologiques aux changements de l'utilisation des terres, et ainsi être utilisés pour l'élaboration de plans de conservation des eaux et des sols. La précision des résultats d'érosion est liée à la fiabilité de la composante hydrologique du modèle. L'étude de l'érosion hydrique basée sur les équations fondamentales de l'écoulement de l'eau et de transport de masse en utilisant l'approximation d'onde cinématique, est recommandée. C'est dans ce sens que le modèle KINEROS est utilisé.

Le présent travail, s'inscrit dans le cadre d'une recherche sur les systèmes de gestion d'eau capable de satisfaire une demande croissante en aliments dans un contexte de rareté d'eau, tout en respectant l'environnement. Il correspond à l'une des composantes d'une étude réalisée pour essayer de proposer un plan de gestion des eaux d'un lac collinaire visant un développement durable en zone semi-aride. Pour ce faire, la démarche suivante a été entreprise.

- a) Estimation des volumes d'eau et de sédiments dans le lac collinaire par le biais de modèle(s) à paramètre(s) physiques distribués ;
- b) Choix des espèces végétales à cultiver sur le bassin versant dans un contexte de rareté de l'eau ;
- c) Estimation théorique des besoins en eau des cultures ;
- d) Identification des cultures pouvant être pratiquées sur le bassin versant.

2 – MATÉRIEL ET METHODES

2.1 Les modèles outil de simulation et de prévision

Les modèles mathématiques à paramètres physiques-distribués peuvent être utilisés comme outil de simulation et de prévision pour les bassins versants non contrôlés hydrologiquement. En effet, comme reporté par OBIUKWU DURU

et HJELMFELT (1994), ces modèles permettent une prévision fiable des ruissellements issus de bassins versants non jaugés. De même, ils permettent d'évaluer les réponses hydrologiques aux changements d'utilisation des terres.

Plusieurs modèles hydrologiques distribués ont été utilisés dans la littérature (HEC-1, TOPMODEL, KINEROS, SWRRB, ANSWERS, EPIC, ... etc.). Dans notre cas, c'est le modèle KINEROS (WOOLHISER *et al.*, 1990 d'après GIRALDEZ, 1994) qui a été retenu car c'est un modèle applicable sur des unités spatiales de tailles variables, sur des petits bassins versants et pour des écoulements hortonien. Ce modèle a été appliqué pour la simulation du ruissellement pour différents événements pluviométriques et des tailles de champs variables (OBIUKWU DURU et HJELMFELT, 1994 et SMITH *et al.*, 1996).

D'après ZEVENBERGEN et PETERSON (1988) ; in SMITH *et al.*, (1996), le modèle KINEROS semble donner de meilleurs résultats de simulations que d'autres modèles. OBIUKWU DURU et HJELMFELT (1994) rapportent qu'ils ont réussi à appliquer le modèle KINEROS pour la prévision du ruissellement sans procédure de calage.

Le modèle KINEROS a été appliqué sur un micro bassin versant de 40 ha en amont du bassin versant de M'Richet El Anze (LAJILI, 1998) afin d'évaluer la capacité de ce modèle à prédire le ruissellement et les productions en sédiments, en affectant aux différents paramètres de ce modèle des valeurs réalistes basées sur les résultats expérimentaux collectés dans la littérature.

On développe ici, sur le cas pratique du lac collinaire M'Richet El Anze, la possibilité d'utilisation du modèle KINEROS sans procédure de calage pour l'estimation des volumes d'eau et de sédiments pour répondre à l'étape 1 de la démarche citée plus haut. Cette étape vise à identifier les paramètres physiques et distribués nécessaires pour bâtir la base de données à utiliser pour l'application de ce modèle. Les paramètres ayant une signification physique et étant distribués, confèrent à la base de données obtenue un caractère prévisionnel qui une fois couplée avec le modèle hydrologique peut aider dans la gestion des ressources en sol et en eau.

Ce cas d'étude apporte une réponse à cette question en proposant la procédure suivante :

- a) Délimitation et découpage du bassin versant.
- b) Détermination de la pente et du sens de l'écoulement.
- c) Élaboration d'une carte de vocation agricole pour l'ensemble du bassin versant, sur la base de caractéristiques de sol, afin de connaître l'occupation du sol à un instant donné pour l'application du modèle KINEROS.
- d) Élaboration d'une carte d'aménagement anti-érosif en se basant sur des caractéristiques topographiques et d'état de surface du sol de chaque parcelle.
- e) Établissement d'une carte d'aménagement agricole issue de la confrontation de la carte culturelle et de la carte des aménagements anti-érosifs.
- f) Estimation des Paramètres de sol et de surface du sol.
- g) Détermination de la pluie cumulée en fonction du temps par intervalles de temps de 15 minutes.
- h) Estimation du paramètre caractérisant l'agressivité de la pluie.

2.2 Description du Modèle KINEROS

Le modèle KINEROS est un modèle d'érosion à paramètres physiques distribués et par évènement. Il décrit les processus d'interception, d'infiltration, d'écoulement de surface et d'érosion à partir de petits bassins versants agricoles ou urbains (WOOLHISER *et al.*, 1990). Le bassin versant est représenté par une cascade de parcelles et de canaux.

Il utilise l'approximation d'onde cinématique des équations de Saint Venant pour les écoulements de surface et dans les canaux 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). Les caractéristiques hydriques du sol nécessaires pour l'application de cette équation étant la conductivité hydraulique à saturation (K_s), la charge capillaire à saturation (ψ_g), la porosité du sol (POR), la saturation relative maximale (S_{max}) et la saturation relative initiale (S_r) (WOOLHISER *et al.*, 1990).

Durant la décrue, correspondant à un écoulement permanent non saturé, l'équation d'infiltration utilisée est basée sur la relation de Brooks et Corey, reliant le flux d'eau dans le sol et la saturation relative en état permanent (WOOLHISER *et al.*, 1990).

La résolution numérique des équations d'ondes cinématiques est faite par la méthode implicite des quatre points.

L'équation générale utilisée pour la description des dynamiques des sédiments, est basée sur l'équation de bilan de masse (BENNETT, 1974).

L'érosion totale est représentée par la somme de l'érosion due à la pluie et de l'érosion hydraulique.

L'érosion causée par l'impact des gouttes de pluie (g_s) est donnée par :

$$g_s = c_f k(h) r \quad q > 0 \quad (1)$$

$$g_s = 0 \quad q < 0 \quad (2)$$

Où :

c_f = constante ;

$k(h) = \exp(-c_h h)$, facteur de réduction relié à l'accroissement de la hauteur d'eau à la surface du sol ;

h = hauteur de la lame de ruissellement ;

c_h = paramètre tampon de l'érosion par effet gouttes de pluie ;

r = hauteur de pluie pendant un intervalle de temps ;

q = pluie excédentaire.

L'érosion hydraulique, g_h , est modélisé comme un processus de transfert cinématique, relié à la différence entre la concentration d'équilibre (C_{mx}) et la concentration des sédiments dans l'écoulement (C_g), et est donné par cette relation :

$$g_h = C_g (C_{mx} - C_g) A \quad (3)$$

Où :

C_g = coefficient de transfert

A = section mouillée

Pour la capacité de transport, le modèle KINEROS donne le choix d'utilisation de six relations de transport (WOOLHISER *et al.*, 1990), en se basant sur les travaux de ALONSO *et al.* (1981) et JULIEN et SIMONS (1985).

L'équation de bilan de masse dans KINEROS est résolue numériquement par le même algorithme que la composante hydrique.

Le modèle peut être utilisé pour déterminer les effets de différentes interventions, telles que les développements urbains, les petits réservoirs de rétention ou encore les aménagements des cours d'eau sur les hydrogrammes de crues et la production de sédiments.

2.3 Description et estimation des paramètres

2.3.1 Paramètres des caractéristiques du sol

La conductivité hydraulique à saturation effective (FMIN), la tension capillaire nette effective au niveau du front d'humectation (G), la teneur en eau initiale du sol (θ), la porosité totale du sol (POR), les saturations relatives initiale et maximale ainsi que la teneur en cailloux du sol, sont les principaux paramètres d'infiltration.

L'estimation des paramètres a été faite sur la base de la classification texturale de l'USDA établie à partir des analyses d'échantillons de sol effectuées sur le bassin versant. En effet, un dispositif d'échantillonnage des données de sol correspondant à 36 points de mesure a été établi. Ces points ont été choisis aléatoirement sur la base de la carte pédologique de FOURNET (1968), en essayant d'intégrer les 13 types pédologiques dominants identifiés sur le bassin versant.

Les résultats présentés par RAWLS *et al.* (1982), sont relatifs à l'analyse statistique de données collectées sur 1 323 sols avec 5350 horizons assemblées de 32 états américains. Ainsi, sur la base des 11 classes texturales du sol de l'USDA (United States Department of Agriculture) une estimation des différentes caractéristiques physiques apparentes et hydriques du sol sont données. D'après RAWLS *et al.* (1982), ces résultats peuvent être utilisés pour étudier des modèles théoriques par comparaison avec un ensemble large de données expérimentales. Ainsi, la prédiction de la rétention d'eau d'un sol (cm^3/cm^3) pour un potentiel matriciel donné, en fonction des teneurs en argiles, limons, sable et de matière organique, ainsi que de la densité apparente (g/cm^3) et des humidités du sol à 0,33 et 15 bars (cm^3/cm^3), est rendue possible grâce à l'utilisation de régressions linéaires. C'est cette approche qui est utilisée pour l'estimation des paramètres physiques apparents et hydriques du modèle KINEROS.

En se basant sur les 36 points de mesures effectués sur l'ensemble du bassin versant, une estimation de K_{USLE} à partir du normographe de WISCHMEIER et SMITH (1978) ; in LAL (1988) a été faite.

Suivant le découpage manuel du bassin versant en parcelles, des valeurs moyennes pondérées de chaque paramètre ont été calculées pour chaque parcelle.

2.3.2 Paramètres de surface du sol

Les 3 principaux paramètres de surface du sol du modèle KINEROS sont le coefficient de rugosité de Manning (R_1), la hauteur d'interception par la

végétation (DINTR) et la proportion du sol couverte par du gravier (PAVE). La surface de rugosité, telle que quantifiée par le coefficient de Manning, dépend de la texture de surface du sol, de la couverture du sol, de la hauteur de la lame d'eau à la surface du sol et du régime ou du type de l'écoulement (DICKINSON et RUDRA, 1990). Plusieurs valeurs du coefficient de Manning ont été présentées dans la littérature, une attention particulière devra être portée pour la différence qui existe entre les valeurs dans les cours d'eau et sur les parcelles ou versants. En effet, d'après DICKINSON et RUDRA (1990), vu que la valeur du coefficient de Manning dépend du tirant d'eau de l'écoulement, les conditions d'écoulement dans les canaux et sur les parcelles sont très différentes.

Des valeurs estimatives du coefficient de rugosité ont été présentées par FOSTER *et al.* (1980) ; in DICKINSON et RUDRA, (1990) et ce pour des traitements physiques de surface, des états et des types de végétation et des états de surface correspondants à différents labours. Le coefficient de rugosité étant liée à des caractéristiques dynamiques au niveau du bassin versant, sa valeur ne devrait pas être constante mais variable à l'échelle de l'année et entre les années. Partant de cette remarque, le paramètre (R_1) permet de caractériser la variation des états de surfaces sur des terres de cultures, en suivant une procédure basée sur l'établissement de plans culturaux précis. Une caractérisation de la végétation naturelle annuelle (vivace) en période de dormance et en période de pleine activité physiologique, permettra l'estimation de deux valeurs caractéristiques saisonnières du coefficient de Manning.

L'estimation des valeurs du coefficient de Manning peut se faire au laboratoire sur des planches ou des canaux à pentes et couvertures variables ou sur champ sur des parcelles au niveau d'un bassin versant ou sur des cours d'eau naturels. REE *et al.* (1977) ont estimé les valeurs du coefficient de Manning sur des bassins versants de 6,8, 37,2 et 83,4 ha occupés par des prairies en Oklahoma (USA). Leur approche s'est basée sur l'analyse des hydrogrammes de ruissellement, l'utilisation d'une pente moyenne du bassin versant ainsi que la longueur de l'écoulement de surface par des méthodes géomorphologiques. En comparant les résultats expérimentaux de terrain et ceux de laboratoire, une concordance a été trouvée pour les faibles couvertures d'herbe, mais des différences entre valeurs expérimentales de terrain et de laboratoires sont notées, pour des couvertures moyenne et forte.

SALAMA et BAKRY (1992), ont proposé différentes formules expérimentales basées sur des modifications de l'équation modifiée de Manning sur des canaux ouverts avec des mauvaises herbes aquatiques submergées. Les formules analytiques proposées dépendent de la distribution des mauvaises herbes le long du périmètre mouillé du canal et du pourcentage de la densité de végétation par rapport à la section en travers du chemin d'eau. Ceci semble être intéressant pour les segments de cours d'eau du bassin versant.

Dans notre cas, ce sont les valeurs données par DICKINSON et RUDRA, (1990) qui sont utilisées pour l'estimation du coefficient de rugosité R_1 .

2.4 Applications du Modèle KINEROS

2.4.1 Démarche

Le modèle KINEROS nous a été communiqué par J.-V. GIRALDEZ (1993). Une station hydrologique contrôlant un sous bassin versant de 40 ha du bassin

versant de M'Richet El Anze a été installée début 1994 (LAJILI, 1998). Pour l'application du modèle KINEROS, la démarche suivante a été suivie :

a) Les enregistrements pluviographiques mesurés sur le bassin versant de M'Richet El Anze ainsi que les mesures hydrométriques et sédimentologiques effectuées au niveau de la station hydrologique durant la période comprise entre septembre 1994 et mars 1996 ont été utilisés pour étudier les performances du modèle KINEROS. Une station de mesure a été construite début 1994, pour mesurer les apports liquides et solides drainés par le bassin versant. Elle consiste en un canal rectangulaire en béton (9,3 m × 1,2 m × 1,5 m, avec une pente moyenne de 2,5 %), un limnigraphe OTT X classique à rotation journalière, une échelle limnimétrique et un seuil déversoir à l'extrémité aval du canal. Le dépouillement des enregistrements hydrométriques est réalisé manuellement sur des pas de temps de 10 minutes. La mesure des sédiments est faite de deux manières ; pendant le ruissellement des échantillons d'eau de 1 litre sont prélevés à l'entrée de la station en notant le temps de prélèvement. Les prises d'échantillons sont réparties sur la durée totale du ruissellement. La masse sèche totale des sédiments, pour chaque échantillon, est déterminée par méthode d'évaporation par séchage à l'étuve. Ceci correspond aux sédiments en suspension, dont la concentration est donnée en grammes/litres. Le débit solide, exprimé en g/s, est obtenu en multipliant le débit liquide, Q , par la concentration en sédiments. La deuxième méthode de mesure consiste à peser après séchage à l'air libre des sédiments déposés au fond du canal. La disponibilité des mesures hydrométriques et sédimentologiques à l'exutoire du bassin versant, a permis l'étude des performances du modèle. Cette étude consiste à appliquer le modèle sans procédure de calage avec des valeurs réalistes des paramètres, puis essayer d'améliorer les résultats de simulation du ruissellement et des sédiments moyennant une procédure de calage ;

b) Les mesures pluviographiques enregistrées en amont du bassin versant de M'Richet El Anze et les enregistrements hydrométriques effectués au niveau de la station hydrologique durant les années 1997 et 1998, ont été utilisés pour la simulation des apports liquides et solides dans le lac collinaire de M'Richet El Anze en appliquant le modèle KINEROS sans procédure de calage.

2.4.2 Découpage du bassin versant

Le bassin versant est découpé en unités géographiques à écoulement superficiel unidimensionnel, correspondant aux parcelles et des segments de cours d'eau qui correspondent aux canaux. Ce découpage peut être fait manuellement sur la base de la carte topographique, en s'assurant que chaque parcelle a un écoulement unidimensionnel et se déverse dans un canal. Sur la base du découpage du bassin versant, la longueur de la parcelle dans le sens de l'écoulement dominant, la largeur de la parcelle et sa pente sont calculées et saisies dans le fichier paramètres du modèle KINEROS.

2.4.3 Application du modèle KINEROS pour la Simulation des Apports Liquides et Solides

L'application de tout modèle pour la prévision est précédée d'une étude des performances du modèle, avec ou sans procédure de calage, pour la simulation des résultats hydrologiques ainsi qu'une étude de sensibilité du modèle aux variations de ses paramètres. Ainsi, le modèle KINEROS est appliqué avec

des paramètres réalistes et les résultats simulés sont comparés aux données observées sur un sous bassin du bassin versant de M'Richet El Anze pour la période septembre 1994 et mars 1996. Au total 9 ruissellements ont été enregistrés au niveau du limnigraphe de la station hydrologique. L'application du modèle sans procédure de calage avec des valeurs réalistes des paramètres, n'a pas approché le domaine de solution pour 2 averses sur les 8 enregistrées. La phase suivante était d'essayer d'améliorer les résultats de simulation du ruissellement obtenus. Les essais de calage du modèle en changeant certains paramètres du modèle, ont permis de dégager une procédure d'application du modèle basée sur la séparation des averses en fonction de l'état d'humidité antérieure du sol. Ainsi, pour les événements pluvieux survenant sur sols secs, le changement des valeurs de la tension capillaire nette effective au niveau du front d'humectation (Ψ_e) est suffisant pour améliorer la qualité des résultats simulés. Pour les ruissellements survenant sur sols humides, plus d'un paramètre est à changer. Ainsi, pour le choix des valeurs initiales des paramètres du modèle KINEROS, la procédure présentée par OBIUKWU DURU et HJELMFELT (1994) a été suivie comme décrit ci-après.

Pour les conditions sèches, pour un ruissellement donné, une valeur se rapprochant le plus du point de flétrissement permanent est affectée au paramètre de saturation initiale. Alors que les paramètres (FMIN) et (ψ_e), sont considérés comme des paramètres de calibration. Leurs valeurs finales vont correspondre aux résultats simulés se rapprochant le plus des données observées. Cette procédure est répétée pour tous les ruissellements survenant sur sol sec.

Pour les conditions humides, pour un ruissellement donné, les valeurs initiales des paramètres variables du modèle sont choisies suivant la procédure ci-jointe. On affecte à (FMIN) une valeur qui approche ($K_s/2$) et pour la saturation initiale une valeur se rapprochant le plus de la saturation maximale.

Les paramètres de calage du modèle dans ce cas sont (FMIN), la saturation relative initiale et la tension capillaire nette au niveau du front d'humectation (ψ_e). En affectant des valeurs arbitraires pour ces 3 paramètres, leurs valeurs finales vont correspondre aux résultats simulés qui reproduisent mieux l'hydrogramme observé.

2.4.4 Application du modèle KINEROS pour la Prédiction des Apports Liquides et Solides

2.4.4.1 Données de Base

La délimitation du bassin versant de M'Richet El Anze a été faite à partir du lever topographique à l'échelle 1/5 000. Le bassin versant a été découpé en 22 unités : 14 parcelles et 8 tronçons de cours d'eau (figure 1). La longueur et la largeur de chaque unité ont été mesurés et serviront pour alimenter le fichier de données du modèle. La surface de chacune des parcelles a été calculée.

En se basant sur le lever topographique, le sens de l'écoulement principal a été déterminé pour chaque parcelle. La pente, dans le sens de l'écoulement, a été calculée et sera introduite comme donnée pour l'application du modèle KINEROS.

L'élaboration de la carte culturale pour l'ensemble du bassin versant a été établie en appliquant la méthodologie suivante. Une affectation des parcelles pour les cultures en sec ou en irriguée est effectuée sur la base de trois critères

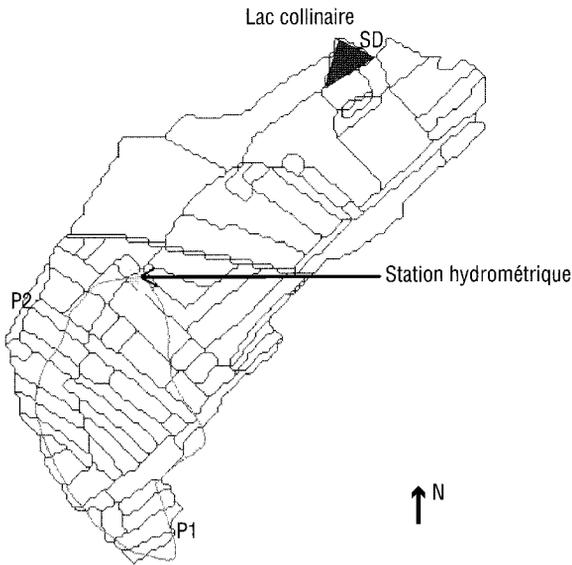


Figure 1 Délimitation du bassin versant de M'Richet El Anze.
Delimitation of the M'Richet El Anze Watershed.

qui sont : la charge caillouteuse du sol, la distance par rapport à la source d'eau et la profondeur du sol. Une carte de vocation agricole est établie sur l'ensemble du bassin versant en se basant sur les critères : profondeur et charge caillouteuse du sol. En effet, en prenant des intervalles de variation de profondeur du sol spécifiques pour le bassin versant en question, les utilisations possibles des terres sont : parcours naturel, parcours amélioré, arbustes pérennes, cultures annuelles et arboriculture.

Ainsi, les terres de parcours naturels étant situées sur des sols dont la profondeur est inférieure à 10 cm, vont jouer le rôle d'impluvium pour la collecte des eaux de ruissellement vers les terres situées en aval. Quant aux cultures annuelles, elles regroupent les céréales, les légumineuses et le maraîchage. Ce dernier et l'arboriculture irriguée ne sont introduits que dans les parcelles classées aptes à l'irrigation. Les autres cultures pluviales telles que les céréales, les légumineuses et l'arboriculture sont proposées à l'aval d'un impluvium, constituant une forme d'intensification agricole pour la valorisation des eaux de ruissellements importantes dans ces zones, surtout en automne et au printemps.

Une carte d'aménagement de conservation des eaux et des sols (CES) a été élaborée, en se basant sur la pente et la charge caillouteuse de chaque parcelle. En effet suivant ces deux critères, des techniques culturales variant du labour en courbes de niveau jusqu'aux terrasses en passant par les cultures en bandes alternées de niveau sont proposées.

La superposition de la carte culturelle et de la carte des aménagements anti-érosifs, a permis d'établir une carte d'aménagement agricole, qui est la base de l'application du modèle pour la prévision des apports liquides et solides dans le lac collinaire.

2.4.4.2 Fichiers d'entrées

Deux fichiers d'entrées sont nécessaires à définir pour l'application du modèle KINEROS. Un fichier pluie où le nombre de pluviographes et la pluie cumulée en fonction du temps sont représentés. Un fichier paramètres hydrologiques, où toutes les unités sont caractérisées. Ce fichier renferme les données décrivant le réseau de parcelles et de canaux formant le bassin versant, leurs dimensions et pente, la rugosité hydraulique de chaque unité et les paramètres d'infiltration et d'érosion de chaque élément.

D'après l'analyse des enregistrements hydrométriques effectués au niveau de la station hydrologique située sur le bassin versant de M'Richet El Anze, 9 ruissellements ont été notés durant les années 1997 (6) et 1998 (3). Ce sont ces averses qui sont utilisées pour l'application du modèle KINEROS et pour l'estimation des volumes liquides et solides dans le lac de M'Richet El Anze. La séquence pluvieuse des averses telles qu'elles sont enregistrées est la suivante : 02/06/97, 18/08/97 (a), 18/07/97 (b), 5/10/97, 12-13/11/97, 23/11/97, 23-24/9/98, 10/10/98 (a) et 10/10/98 (b) (tableau 1), qui donne la hauteur de la pluie par averse (P), la durée totale de l'averse en minutes et l'intensité maximale de l'averse calculée pour un intervalle de temps de 20 minutes [$I_{\max}(20')$].

Les paramètres de surface du sol qui sont directement liés à l'état de la surface du sol (labour, chaumes, période culturale, etc.) sont le coefficient de rugosité de Manning et l'interception de la pluie par la végétation. Les autres paramètres sont supposés être constants en fonction du temps à l'échelle de l'année, l'estimation de la rugosité et de l'interception est faite pour les dates correspondant aux mois de septembre, octobre, novembre, juin et août.

Tableau 1 Caractéristiques des Averses Simulées par le Modèle KINEROS

Table 1 *Characteristics of the simulated rainstorms by the KINEROS model*

Averse	P (mm)	Durée (min)	$I_{\max(20')}$ (mm/h)
02/06/97	32	80	37,5
18/08/97 (a)	8,5	20	25,5
18/08/97 (b)	5,5	25	16,5
05/10/97	32,5	140	27
12-13/11/97	11,5	200	13,5
23/11/97	18,5	240	6
23-24/9/98	36	240	24
10/10/98 (a)	4	120	3
10/10/98 (b)	13,5	300	6

Les paramètres étant liés à la végétation, une identification de l'espèce végétale et son état de développement en fonction de son cycle végétatif sont nécessaires. C'est ainsi qu'à partir de la carte de vocation agricole établie, nous avons délimité une surface irrigable en considérant la charge caillouteuse (la parcelle est rejetée si la charge caillouteuse dépasse 5 %), dans le cas contraire c'est la distance (1 km) entre la parcelle et la source d'eau (lac ou puits) et la profondeur du sol qui sont utilisés pour retenir ou rejeter la parcelle.

Les surfaces des parcelles ainsi obtenues varient entre 3,80 et 18,16 ha, alors que les pentes s'étalent entre 1,3 et 14,2 %. L'application de la procédure développée plus haut, nous a permis de dégager une surface irrigable de 28,7 ha, répartie en 10,5 ha de maraîchage (soit 36 % de la surface irrigable), 10,3 ha de légumineuses (36 %), 6,4 ha d'arboriculture fruitière en sec (22 %) et 1,5 ha d'arbustes pérennes (6 %). L'estimation des paramètres rugosité de surface et interception pour les différentes périodes considérées a été faite sur la base de la répartition spatiale des cultures identifiées à partir de la carte agricole des cultures en sec et en irrigué.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Application du modèle KINEROS pour la simulation des apports liquides et solides

L'application du modèle KINEROS sur le sous bassin versant de 40 ha du bassin versant de M'Richet El Anze, a montré que les meilleurs résultats ont été obtenus pour des averses de durée inférieure à 1 heure et à très forte intensité et dont la hauteur totale de pluie dépasse les 20 mm. Les figures 2 et 3 donnent les hydrogrammes mesurés et simulés par le modèle KINEROS pour les averses du 03/10/94 et 24/09/95. L'événement averse-ruissellement qui a donné les meilleurs résultats hydrologiques était celui du 3/10/94. L'analyse des couples averses-ruissellements, met en évidence l'importance de la position géographique du pluviographe sur le bassin versant, en particulier amont et aval. La précision des résultats hydrologiques et par conséquent sédimentologiques, est liée aux averses prises en considération pour l'application du modèle. En effet, les enregistrements pluviographiques constituent la donnée de base nécessaire pour l'application du modèle KINEROS, utilisée pour la représentation de la pluie cumulée en fonction du temps du fichier pluie. Un affinement de l'effet de la position géographique du pluviographe sur les résultats du modèle KINEROS

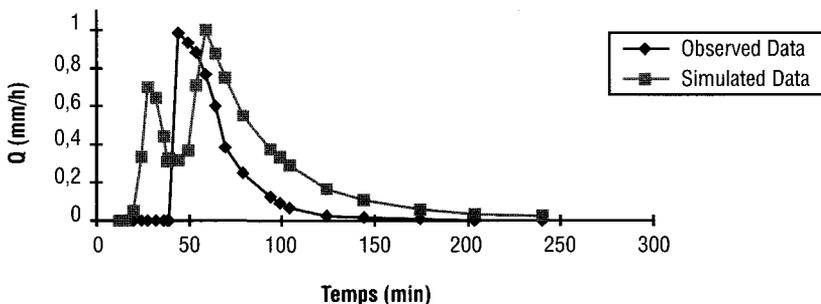


Figure 2 Hydrogrammes Mesuré et Simulé par le Modèle KINEROS (averse du 03/10/94).

Measured and KINEROS simulated hydrographs (rainstorm of the 03/10/94).

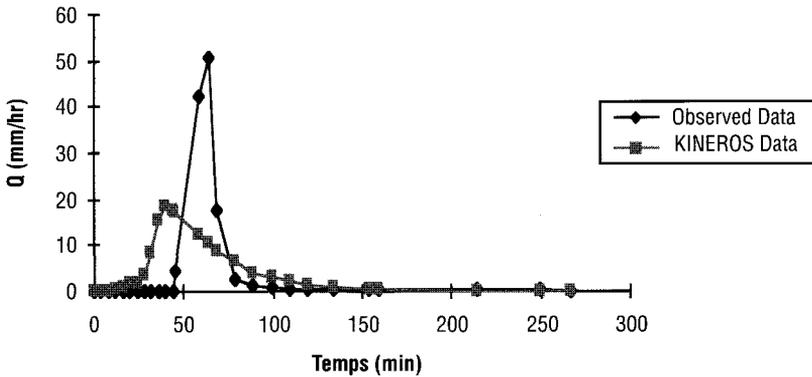


Figure 3 Hydrographes Mesuré et Simulé par le Modèle KINEROS (averse du 24/09/95).
Measured and KINEROS simulated hydrographs (rainstorm of the 24/09/95).

est nécessaire. Ceci est d'autant plus justifié par le fait que le gradient topographique est très important sur le bassin versant de M'Richet El Anze soit une dénivelée de 72 mètres entre l'amont et l'aval (2 km de long).

3.2 Analyse de sensibilité du modèle KINEROS à la variation de ses paramètres

Le meilleur calibrage du modèle par rapport au débit maximum, Q_{Lmax} , pour l'averse du 03/10/1994, a été obtenu pour les valeurs suivantes : $FMIN = 1,1-6,0$ mm/h, $G = 393-626$ mm, $RECS = 6,6-10$ mm et $R_1 = 0,13-0,20$, où RECS correspond à un facteur de régression de l'infiltration. Ces valeurs correspondent aux valeurs extrêmes au niveau des parcelles du bassin versant. Le tableau 2 regroupe les valeurs observées et simulées par KINEROS pour les paramètres cités, les résultats regroupent le débit maximum liquide (Q_{Lmax}), le temps de montée (T_{max}), la concentration maximale en sédiments (C_{max}), le débit solide maximum (Q_{smax}), la lame ruisselée (L_r), la quantité totale de sédiments arrivant à l'exutoire du bassin versant (M_s) et l'érosion spécifique (E_s).

Tableau 2 Comparaison des valeurs observées et simulées par le Modèle KINEROS pour l'averse du 03/10/94.

Table 2 Comparison between observed and KINEROS simulated data for the rainstorm of the 03/10/94.

Résultats	Q_{Lmax} (mm/h)	T_{max} (min)	C_{max} (g/l)	Q_{smax} (kg/s)	L_r (mm)	M_s (t)	E_s (t/ha)
Mesurés	0,98	44,0	182,5	18,5	0,46	37,2	0,93
Simulés	0,94	64,0	149,2	14,9	1,07	107,3	2,8
V_{mes}/V_{sin}	1,04	0,69	1,22	1,24	0,43	0,35	0,33

En considérant les paramètres sus indiqués, une analyse de sensibilité du modèle a été faite en faisant varier un seul paramètre et en maintenant les autres fixes. Cette analyse montre que :

1) La variation du paramètre d'infiltration (RECS) fait varier considérablement le débit maximum de ruissellement et par conséquent le débit solide maximum et agit peu sur la valeur de la concentration maximale ;

2) Le coefficient de rugosité de Manning affecte le débit maximum de ruissellement, le temps où ce débit est enregistré ainsi que la masse totale de sédiments et l'érosion spécifique, en particulier pour les fortes valeurs de ce coefficient ;

3) La variation du paramètre du potentiel matriciel au niveau du front d'humectation, par rapport aux valeurs expérimentales, réduit la qualité des résultats trouvés.

3.3 Application du modèle KINEROS pour la Prédiction des Apports Liquides et Solides

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3, correspondant à la pluie par averse (P), la lame ruisselée (Lr), le volume de ruissellement (Vr), le coefficient de ruissellement (Kr), la quantité totale de sédiments à l'exutoire du bassin versant (S) et l'érosion spécifique (Es). Ce tableau montre que, le modèle simule les apports liquide et solide sur le bassin versant de 135,35 ha pour des averses de durées supérieures ou égales à 80 minutes. Ceci est lié au fait que le modèle décrit des ruissellements de type Hortonien, généré par de fortes intensités de pluie et une saturation superficielle du sol. Ainsi sur 7 averses simulées par le modèle KINEROS, 4 uniquement ont engendré un ruissellement. Les principaux ruissellements (au nombre de 3) sont générés pour des averses dont la hauteur de pluie totale est supérieure ou égale à 32 mm et l'intensité de pluie maximale pour un intervalle de temps de 20 minutes est supérieure ou égale à 24 mm/h.

Le tableau 3 montre que se sont les événements pluvieux exceptionnels, en terme de hauteur et d'intensité de pluie, qui génèrent les ruissellements et les sédiments les plus importants (averses du 02/06/97, du 05/10/97 et du

Tableau 3 Quantification des Apports Liquides et Solides par le Modèle KINEROS
Table 3 *Water and sediment quantification using the KINEROS model*

Averse	P (mm)	Lr (mm)	Vr (m ³)	Kr (%)	S (t)	Es (t/ha)
02/06/97	32	7,7	10422	24,1	2745	20,3
05/10/97	32,5	2,5	3384	7,6	941	6,9
12-13/11/97	11,5	0	0	0	0	0
23/11/97	18,5	0	0	0	0	0
23-24/9/98	36	3,4	4602	9,4	1229	9,1
10/10/98(a)	4	0	0	0	0	0
10/10/98(b)	13,5	1,3	1759	9,6	47	0,3
Moy/an	21,1	2,1	2842	9,9	709	5,2

23-24/09/98). Les coefficients de ruissellement par averse ont ainsi varié de 7,6 % à 24,1 % qui sont des valeurs communes pour le contexte semi-aride tunisien où le ruissellement est généré par de fortes intensités de pluie survenant sur sol souvent saturé partiellement en eau en surface. Ceci nous incite à mener une étude statistique des averses pour déterminer l'occurrence des averses et leurs distributions spatiales sur le site d'étude. Les résultats sédimentologiques du modèle KINEROS donnent un maximum de 20,3 t/ha pour l'averse du 02/06/97 ($P_{\text{tot}} = 32$ mm, $I_{\text{max}(20')} = 37,5$ mm/h) et 9,1 t/ha pour l'averse du 23-24/09/98 ($P_{\text{tot}} = 36$ mm, $I_{\text{max}(20')} = 24$ mm/h) ayant donné les ruissellements les plus importants soit 10 422 m³ et 4 602 m³ respectivement. Ainsi, l'application du modèle KINEROS, en mode de prévision et sans procédure de calage sur le bassin versant de M'Richet El Anze, donne qu'en moyenne 1 m³ d'eau transporte 270 kg de sédiments, ce qui représente un fort potentiel de transport par le ruissellement justifié en particulier par l'agressivité des averses, les fortes pentes et les longueurs des parcelles. Ainsi, des interventions pour la conservation des eaux et des sols sur ce bassin versant sont nécessaires afin de réduire les pertes en eau et en sol par ruissellement. Toutefois, il faut noter que la quantité de sédiments simulée par le modèle correspond à la somme du transport solide par suspension et par charriage de fond et tenant compte du fait que les sédiments en suspension représentent environ 55 % du total de sédiments, la vase se déposant dans le lac collinaire ne correspond qu'à une partie des sédiments simulés par le modèle KINEROS.

4 - CONCLUSIONS

L'utilisation du modèle KINEROS sur un petit bassin versant de 135,35 ha en zone semi-aride tunisienne à relief accidenté en utilisant des valeurs réalistes des paramètres puisées dans la littérature, présente un outil intéressant d'aide à la gestion des terres et des eaux sur les bassins versants situés en zones semi-arides tunisiennes. En effet, les résultats du modèle obtenus en mode de simulation, montrent que ce modèle est applicable pour des averses de durée inférieure à 1 heure, à des intensités dépassant les 20 mm/h et dont la hauteur totale de pluie dépasse les 20 mm.

L'élaboration d'une carte d'aménagement agricole, correspondant au produit d'une carte culturale et d'une carte d'aménagements de conservation des eaux et des sols (CES), nécessaire pour l'application de ce modèle en mode de prévision, présente un intérêt pour le contrôle de l'érosion hydrique sur les bassins versants et l'amélioration du fonctionnement des barrages situés à leur aval. En effet, la détermination de la représentation spatiale des paramètres des sols conditionnant le processus de l'érosion hydrique ainsi que l'identification des cultures protégeant les sols contre cette érosion constituant la base de l'application de ce modèle, présente un outil de gestion durable des terres et des barrages.

La généralisation de l'application de ce modèle sur d'autres zones nécessite une étude statistique des averses permettant la détermination de l'occur-

rence des averses et leurs distributions spatiales au niveau du bassin versant considéré.

L'analyse des résultats issus de l'application de ce modèle en mode de prévision sur le bassin versant de M'Richet El Anze permet de formuler les remarques suivantes :

1 – La faiblesse des volumes de ruissellement et leur irrégularité temporelle, incite à utiliser les eaux du lac collinaire pour l'irrigation d'appoint d'espèces végétales tolérantes au déficit hydrique. Les zones semi-arides tunisiennes à relief élevé et influencées par la proximité de la mer, constituent des sites où l'emploi de retenues collinaires est rentable ;

2 – La valorisation des eaux de ruissellement automnales par la pratique de cultures annuelles rentables sur le plan économique. D'autres zones semi-arides tunisiennes situées en régions montagneuses sous l'influence maritime présentent des forts ruissellements en période printanière, favorables au développement d'un autre type de végétation annuelle ou pérenne ;

3 – La durée de fonctionnement du lac pour l'irrigation est liée d'une part à la disponibilité de l'eau dans le lac en relation avec les besoins en eau des plantes, et d'autre part au temps de comblement de la retenue par les sédiments. Ce temps de comblement est en relation avec l'importance de l'érosion hydrique liée essentiellement à la hauteur de ruissellement et la part du transport solide en suspension par rapport au transport total. L'expérience tunisienne en matière de petits barrages dans les zones semi-arides de hautes altitudes montre que la construction de barrages de dérivation des eaux, s'apprête à une utilisation plus rentable des écoulements hydriques chargés en sédiments dans un contexte climatique assez irrégulier.

Ainsi, les petits barrages présentent un intérêt par la création de points d'eau dans des zones dégradées nécessitant des aménagements de CES. Toutefois, le développement d'une agriculture irriguée durable autour de ces retenues d'eau, reste tributaire de la pérennité de l'eau dans ces zones. D'un autre côté, ces ouvrages de petite hydraulique contribuent à la protection des barrages situés en aval pour un contrôle des quantités de sédiments délivrées vers leurs retenues, garantissant un meilleur fonctionnement de ces ouvrages de grande hydraulique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Professeur J.-V. GIRALDEZ de l'Université de Cordoba en Espagne qui nous a communiqué le modèle KINEROS, les Professeurs F. DE TROCH et P. TROCH de l'Université de Gand en Belgique et le Professeur J.-V. GIRALDEZ pour leurs assistances scientifiques. Nous remercions l'IRD qui a financé l'installation du dispositif de mesure à l'amont du lac collinaire et la collecte des données.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALONSO, C.V., NEIBLING, W.H. et FOSTER, G.R., 1981. Estimating sediment transport capacity in watershed modeling. *Trans. Am. Soc. Agr. Eng.* 24(5):1211-1220, 1226.
- BENNETT, J.P., 1974. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. *Water Resour. Res.*, 10(3): 485-492.
- DICKINSON, W.T. et RUDRA, R.P., 1990. The Guelph Model for Evaluating Effects of Agricultural Management Systems on Erosion and Sedimentation, user's manual version 3.01. School of Engineering, Technical Report 126-86, University of Guelph.
- FOURNET, A., 1968. Étude Pédologique de l'U.R.D. de ROBAA, n° 369. Service Pédologique, Direction H.E.R., Sous-Secrétariat d'État à l'Agriculture, Secrétariat au Plan et à l'Économie Nationale, République Tunisienne.
- GIRALDEZ, J.V., 1993. Stage d'étude sur la modélisation de l'érosion et du transport solide dans le Département des Sols et Irrigations, au sein du Centre de Recherche et de Développement Agronomique « C.I.D.A » à Cordoba, Espagne, du 28/06 au 08/07/1993.
- JULIEN, P.Y. et SIMONS, D.B., 1985. Sediment transport capacity of overland flow. *Trans. ASAE*, 28(3):755-762.
- LAJILI, L., 1998. L'Érosion Hydrique en Zone Semi-Aride Tunisienne : Modélisation, Estimation des Paramètres et Application à l'Aménagement Anti-érosif. Thèse de Doctorat présentée pour l'obtention du Diplôme de Docteur en Sciences Biologiques Appliquées : Aménagement des Terres et des Forêts de l'Université de Gand.
- LAL, R., 1988. Erodibility and erosivity, in *Soil Erosion Research Methods*, édité par R. Lal, 141-160, Soil and Water Conservation Society, Iowa and Subcommission C: Soil Conservation and Environment International Society of Soil Science, The Netherlands.
- OBIUKWU DURU, J. et HJELMFELT, J.A.T., 1994. Investigating prediction capability of HEC-1 and KINEROS kinematic wave runoff models. *J. Hydrol.* 157: 87-103.
- RAWLS, W.J., BRAKENSIEK, D.L. et Saxton, K.E., 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25(5):1316-1320, 1328.
- REE, W.O., WIMBERLEY, F.L. et CROW, F.R., 1977. Manning (n) and the overland flow equation. *Transactions of the ASAE* 20(1):89-95.
- SALAMA, M.M. et BAKRY, M.F., 1992. Design of earthen vegetated open channels. *Water Resources Management*, 6: 149-159.
- SMITH, R.E. et PARLANGE, J.-Y., 1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. *Water Resour. Res.*, 14(3):533-538.
- SMITH, R.E., GOODRICH, D.C., WOOLHISER, D.A. et UNKRICH, C.L., 1996. KINEROS-A kinematic runoff and erosion model, in Vijay P. Singh ed., *Computer models of watershed hydrology*, chap.20: 697-732.
- WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E. et GOODRICH, D.C., 1990. KINEROS, a kinematic runoff and erosion model: Documentation and user manual. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp.