

Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant

The impact of contour ridges on runoff from a small catchment

S. Nasri, J. M. Lamachère et J. Albergel

Volume 17, numéro 2, 2004

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705534ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705534ar>

[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

Nasri, S., Lamachère, J. M. & Albergel, J. (2004). Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 17(2), 265–289. <https://doi.org/10.7202/705534ar>

Résumé de l'article

Dans le milieu aride et semi-aride tunisien, les aménagements de conservation des eaux et du sol jouent un rôle important dans la collecte et le stockage sur les versants des eaux de ruissellement. Cependant l'impact de ces aménagements sur les écoulements reste mal connu. Pour évaluer l'impact de banquettes à rétention totale à l'échelle d'un bassin versant situé au centre de la Tunisie, en zone semi-aride, nous nous proposons dans cet article d'utiliser le modèle géomorphologique H2U, fonction de transfert basée sur la répartition des chemins de l'eau à la surface du bassin. Pour la reconstitution des crues, ce modèle a été couplé à une fonction de production qui définit la pluie nette (lame ruisselée) à partir de la hauteur précipitée sur le bassin versant.

Entre juillet 96 et juillet 97, le bassin versant d'El Gouazine (18,1 km²) a été aménagé en banquettes à rétention totale. La longueur moyenne de ces banquettes est d'environ 100 m pour une hauteur moyenne de 1,50 m. L'écartement moyen entre les banquettes est de 25 m. La superficie aménagée sur le bassin versant est de 783 hectares, soit 43 % de sa superficie. Cet aménagement a intéressé principalement les terres de culture et une partie des parcours dégradés transformés à cette occasion en terres de culture. Dès lors, sur ce bassin, les eaux de ruissellement sont interceptées par ces levées de terre et elles n'atteignent l'oued principal qu'après avoir rempli les fossés créés en amont des banquettes.

Avant l'aménagement en banquettes, le coefficient de ruissellement global du bassin versant était de l'ordre de 7 à 8 % pour les hauteurs de pluie inférieures à 20 mm et compris entre 20 et 30% pour les hauteurs de pluie supérieures à 20 mm. Les pluies d'automne (septembre - octobre) présentaient les coefficients de ruissellement les plus forts car elles sont caractérisées par des intensités très élevées et les sols ne sont pas encore couverts par les végétations naturelles et cultivées. Ils présentent alors des crêtes de battance qui limitent l'infiltration des eaux de ruissellement. Le calage du modèle H2U (fonctions de transfert et de production associée) sur 12 crues avant aménagement a fourni une pluie d'imbibition initiale de 10 mm, une intensité limite pour l'apparition de ruissellement de 3,6 mm.h⁻¹, un coefficient de ruissellement efficace de 42 % et un temps moyen de parcours de l'ordre de 40 minutes. Le modèle a été par la suite validé pour la crue du 20 septembre 1995. Les critères d'ajustement sont bons pour le calage et pour la validation.

Le critère de Nash appliqué aux débits ruisselés est de 0,62 à 0,96 pour le calage et de 0,96 pour la validation.

Après l'aménagement, les pluies enregistrées n'ont engendré qu'un faible ruissellement : un coefficient de ruissellement compris entre 1 à 3% pour les pluies de 30 à 50 mm, un coefficient de ruissellement de 9% pour une pluie de 80 mm (24 septembre 1998). L'utilisation du modèle H2U nous a permis d'évaluer l'impact des banquettes en comparant directement les crues observées avec aménagement et les crues reconstituées par le modèle sans aménagement. Ainsi la pluie du 24 septembre 1998, de fréquence décennale, a-t-elle engendré un ruissellement 4 fois plus faible avec l'aménagement en banquettes, un débit maximum 8 fois plus faible et un temps de réponse 4 fois plus fort. Malgré son extension limitée à 43 % de la surface du bassin d'El Gouazine, l'aménagement anti-érosif en banquettes joue donc un rôle très important sur la rétention des eaux de ruissellement, au point de limiter considérablement, de 50 à 80 %, les apports dans la retenue du petit barrage collinaire. Il convient donc de trouver, pour chaque bassin versant de la dorsale tunisienne, une solution optimale à l'aménagement des terres cultivées sur les versants tout en conservant des apports suffisants aux lacs collinaires pour subvenir aux besoins en eau des cultures irriguées. Pour caler le modèle H2U et sa fonction de production sur des bassins versants aménagés, une meilleure analyse du fonctionnement hydrologique d'un système de banquettes en cascade semble donc nécessaire.

Impact des banquettes sur le ruissellement d'un petit bassin versant

The impact of contour ridges on runoff from a small catchment

S. NASRI¹, J.-M. LAMACHÈRE², J. ALBERGEL³

Reçu le 19 septembre 2002, accepté le 12 juin 2003*.

SUMMARY

In arid and semiarid Tunisian regions, water and soil conservation is an important way to decrease erosion and to collect runoff in hill-slope catchments. However, few studies have focused on the impacts of runoff on water harvesting techniques. This paper deals with the hydrological effects of contour ridges in the El Gouazine catchment located in central Tunisia. Hydrological observations were used to calibrate a conceptual rainfall-runoff model. The H2U hydrological model was used for this purpose (CUDENNEC, 2000; DUCHESNE *et al.*, 1997). This model is built around a production function that defines the net storm rainfall (portion of rainfall during a storm that reaches a stream channel as direct runoff) from the gross rainfall (observed rainfall in the catchment) and a transfer function based on the most complete possible definition of the surface drainage system (CUDENNEC, 2000). The runoff production function defined by NASRI *et al.* (2001) was used for the El Gouazine catchment. Observed rainfall during 5-min time steps was used in the model.

The 18.1 km² El Gouazine catchment is located 15 km south of the town Oueslatia. With an annual average rainfall of 411 mm and a potential evapotranspiration of 1680 mm, the climate can be regarded as semiarid. The main annual rainfall is usually received between September and January. All runoff from the catchment is collected in a small artificial lake, created in 1990. Its initial storage capacity was 233,370 m³. Water level observations in the lake were used to estimate total runoff from the catchment. The altitude of the drainage area varied from 575 m in the south to 375 m in the north at its outlet. The land surface of the catchment is partitioned into the following uses: 40% cereal production alternating with fallow land; 33% pasture,

1 NASRI Slah, INRGREF, B.P. 10 Ariana 2080, Tunisie (nasri.slah@iresa.agrinet.tn)
Tél. (216) 98 57 66 29 - Fax (216) 71 71 79 51

2 LAMACHÈRE Jean-Marie, Mission IRD, B.P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunis, Tunisie
(Jean-Marie.lamachere@ird.intl.tn)

3 ALBERGEL Jean, UR AMBRE-IRD, INRA-ENSAM, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 01, France
(albergel@ensam.inra.fr)

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

shrub-land (carob trees, lentisk), and Esparto grass steppe; 20% Aleppo pine forest (both dense and degraded forest); 6% arboriculture (olive trees, almonds); and 1% lake and dyke area.

Between July 1996 and July 1997, soil contour ridges covering 43% of the total area were constructed in the El Gouazine hillside catchment. The length of each ridge is typically about 100 m with an average height of 1.5 m and an average perpendicular distance between ridges corresponding to about 25 m. Construction of the contour ridges significantly changed the hydrological conditions in the catchment.

Before contour ridges, average global runoff coefficients were 20-30% for autumn rainfalls (september to october) and 4-10% for rainfalls in winter and spring (November to May). Rainfalls during autumn were usually characterized by high intensity and soils were usually compacted with an impermeable surface crust. From November to February, soils usually become more permeable due to agricultural activities (e.g., ploughing) and during March to May infiltration is increased due to increasing crop cover.

During this period, before introducing contours ridges in the El Gouazine catchment, the conceptual rainfall-runoff model based on surface topography and the drainage network was calibrated to reproduce observed runoff satisfactorily. Geomorphologic data (topography and drainage system characteristics) for the catchment were extracted with the geographic information software ERDAS IMAGINE of ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). The procedure allows extracting the actual probability density function (*pdf*) of watercourse lengths in the network (L) for the catchment, the catchment Strahler order (n), and the average length of the watercourse in the network L . These parameters are used in a gamma law type transfer function called H2U (unit hydrograph). For this study, in order to be in the usual situation of flood designing practitioners, we used topographical maps with a scale of 1:50000, which are the commonly available maps in Tunisia, and digital grids with a 10 m resolution. Due to the semiarid landscape and relief, there is no ambiguity in identifying the drainage networks.

Simulated runoffs using both the actual and theoretical pdfs were compared. The theoretical functions give better results, especially with respect to peak flow. This is probably due to smoothing of the drainage system represented by the theoretical density function. The empirical function calculated from maps probably includes errors and uncertainties, which are smoothed in the theoretical function. For both calibration and validation events, results showed an excellent agreement between observed and simulated runoff volumes as well as peak flows. For the Nash criteria, results varied from case to case (from 0.62 to 0.96).

After introduction of the contour ridges, runoff coefficients changed to below 10%. Similarly, inflow to a reservoir at the outlet of the catchment decreased by 50-80%. Observed erosion virtually disappeared after introduction of the contour ridges. Similarly, peak discharge was reduced 60-90%. The changes made in the semiarid catchment will allow agriculture to more efficiently use existing water resources. In practical terms it means that pasture lands can be diverted into cultivated areas (e.g., cereals, olive trees, and almond trees). However, it also means that most surface water infiltrates and eventually replenishes the groundwater, thus leaving downstream areas with almost no surface runoff. Soil contour ridges covering 43% of the El Gouazine catchment area increased the total runoff storage capacity by approximately 258 000 m³. Consequently, contour ridges may be said to present an alternative to the construction of small hillside reservoirs. The introduction of contour ridges therefore has dramatic consequences for downstream runoff conditions. To improve runoff management for both upstream and downstream conditions, it may be necessary to a) simulate runoff effects using a

conceptual rainfall-runoff model and b) allow a certain part of the catchment to deviate a part of the runoff to the downstream natural watercourse.

A conceptual rainfall-runoff based on surface topography and the drainage network was seen to reproduce observed runoff accurately. By applying the model for runoff simulation with and without contour ridges a more detailed comparison of the changed runoff conditions could be made. The detailed hydraulic function of water harvesting techniques is still to a major extent unknown. A detailed study of the hydrological function of contour ridges in a cascade system is necessary to calibrate hydrological models such as H2U and their associated production function on hill-slope catchments with soil surface management.

Key words : *surface management, geomorphic hydrological model, anti-erosive measures, runoff reduction, hill reservoir, hill-slope catchment, arid region, Tunisia.*

RÉSUMÉ

Dans le milieu aride et semi-aride tunisien, les aménagements de conservation des eaux et du sol jouent un rôle important dans la collecte et le stockage sur les versants des eaux de ruissellement. Cependant l'impact de ces aménagements sur les écoulements reste mal connu. Pour évaluer l'impact de banquettes à rétention totale à l'échelle d'un bassin versant situé au centre de la Tunisie, en zone semi-aride, nous nous proposons dans cet article d'utiliser le modèle géomorphologique H2U, fonction de transfert basée sur la répartition des chemins de l'eau à la surface du bassin. Pour la reconstitution des crues, ce modèle a été couplé à une fonction de production qui définit la pluie nette (lame ruisselée) à partir de la hauteur précipitée sur le bassin versant.

Entre juillet 96 et juillet 97, le bassin versant d'El Gouazine (18,1 km²) a été aménagé en banquettes à rétention totale. La longueur moyenne de ces banquettes est d'environ 100 m pour une hauteur moyenne de 1,50 m. L'écartement moyen entre les banquettes est de 25 m. La superficie aménagée sur le bassin versant est de 783 hectares, soit 43 % de sa superficie. Cet aménagement a intéressé principalement les terres de culture et une partie des parcours dégradés transformés à cette occasion en terres de culture. Dès lors, sur ce bassin, les eaux de ruissellement sont interceptées par ces levées de terre et elles n'atteignent l'oued principal qu'après avoir rempli les fossés créés en amont des banquettes.

Avant l'aménagement en banquettes, le coefficient de ruissellement global du bassin versant était de l'ordre de 7 à 8 % pour les hauteurs de pluie inférieures à 20 mm et compris entre 20 et 30 % pour les hauteurs de pluie supérieures à 20 mm. Les pluies d'automne (septembre - octobre) présentaient les coefficients de ruissellement les plus forts car elles sont caractérisées par des intensités très élevées et les sols ne sont pas encore couverts par les végétations naturelles et cultivées. Ils présentent alors des croûtes de battance qui limitent l'infiltration des eaux de ruissellement. Le calage du modèle H2U (fonctions de transfert et de production associée) sur 12 crues avant aménagement a fourni une pluie d'imbibition initiale de 10 mm, une intensité limite pour l'apparition de ruissellement de 3,6 mm.h⁻¹, un coefficient de ruissellement efficace de 42 % et un temps moyen de parcours de l'ordre de 40 minutes. Le modèle a été par la suite validé pour la crue du 20 septembre 1995. Les critères d'ajustement sont bons pour le calage et pour la validation. Le critère de Nash appliqué aux débits ruisselés est de 0,62 à 0,96 pour le calage et de 0,96 pour la validation.

Après l'aménagement, les pluies enregistrées n'ont engendré qu'un faible ruissellement : un coefficient de ruissellement compris entre 1 à 3 % pour les pluies de 30 à 50 mm, un coefficient de ruissellement de 9 % pour une pluie de 80 mm (24 septembre 1998). L'utilisation du modèle H2U nous a permis

d'évaluer l'impact des banquettes en comparant directement les crues observées avec aménagement et les crues reconstituées par le modèle sans aménagement. Ainsi la pluie du 24 septembre 1998, de fréquence décennale, a-t-elle engendré un ruissellement 4 fois plus faible avec l'aménagement en banquettes, un débit maximum 8 fois plus faible et un temps de réponse 4 fois plus fort. Malgré son extension limitée à 43 % de la surface du bassin d'El Gouazine, l'aménagement anti-érosif en banquettes joue donc un rôle très important sur la rétention des eaux de ruissellement, au point de limiter considérablement, de 50 à 80 %, les apports dans la retenue du petit barrage collinaire. Il convient donc de trouver, pour chaque bassin versant de la dorsale tunisienne, une solution optimale à l'aménagement des terres cultivées sur les versants tout en conservant des apports suffisants aux lacs collinaires pour subvenir aux besoins en eau des cultures irriguées. Pour caler le modèle H2U et sa fonction de production sur des bassins versants aménagés, une meilleure analyse du fonctionnement hydrologique d'un système de banquettes en cascade semble donc nécessaire.

Mots clés : Tunisie, dorsale semi-aride, aménagements anti-érosifs, banquettes, modélisation hydrologique, petits barrages collinaires.

1 - INTRODUCTION

L'érosion des terres dans les zones rurales de la Tunisie menace environ 3 millions d'ha, dont la moitié est gravement affectée, soit environ 33 % de la superficie totale du pays (Ministère de l'Agriculture, 1993 ; FARHAT et BOUFAROUAT, 1999). Les aménagements de conservation des eaux et du sol ont pour objectifs la protection des terres, la lutte contre l'érosion, la mobilisation et la maîtrise des eaux de ruissellement et l'amélioration de la production agricole. Plusieurs auteurs ont décrit les aménagements traditionnels (e.g., EL AMAMI 1984, PRINZ 1995, 1999, ENNABLI 1993, ACHOURI 1994, TOBBI 1994). Certaines études se sont intéressées aux aspects techniques de différents types d'aménagements (e.g., SHANAN *et al.*, 1970, ENNABLI 1993, ALAYA *et al.*, 1993, OWEIS et PRINZ 1994), d'autres études ont décrit les aménagements du point de vue leurs utilisations agricoles (e.g., EVENARI *et al.*, 1982), un troisième groupe d'études ont évalué les performances et les effets des aménagements sur l'amélioration de la production agricole et les revenus des agriculteurs (ORON *et al.*, 1983, OWEIS et TAIMEH 1994). Cependant, très peu d'études se sont intéressées à la quantification des impacts hydrologiques des aménagements de conservation des eaux et du sol. GILL (1998) a décrit un projet de conservation des eaux et du sol implanté au Pakistan. L'érosion des versants a pu être contrôlée, les eaux de ruissellement ont été pratiquement totalement retenues sur les versants aménagés et la production agricole a augmenté de 70 %. QUERESHI et WILLARDSON (1995) ont présenté les résultats obtenus à partir d'une recherche expérimentale conduite sur les plateaux du Balouchistan (pluie annuelle de 200 à 300 mm) utilisant des cuvettes de rétention d'eaux de ruissellement alimentées par des impluviums dont la superficie était égale (rapport 1/1) ou deux fois supérieure à la superficie cultivée (rapport 2/1). Pendant une période de trois ans, l'humidité des sols dans les cuvettes aménagées était de 6 à 27 % plus élevée dans les

systèmes de rapport 1/1 que dans les zones non traitées et de 13 à 67 % plus élevée pour les systèmes de rapport 2/1. La production agricole en grain a été trois à quatre fois plus forte dans les zones traitées que dans les zones non traitées. Cependant, peu de recherches ont été entreprises sur la quantification des impacts directs et indirects d'un type d'aménagement donné sur les flux d'eau à l'exutoire d'un bassin versant (ABU-ZREIG *et al.*, 2000 ; MEROT *et al.*, 1999).

Cet article présente les résultats d'une étude sur les impacts des aménagements en banquettes sur les écoulements du petit bassin d'El Gouazine situé en Tunisie Centrale. Ce bassin versant fait partie d'un ensemble de 30 petites retenues artificielles sélectionnées pour former un réseau d'observations hydrologiques dans la dorsale semi-aride tunisienne (ALBERGEL et NASRI, 2001). Il présente l'avantage d'avoir fait l'objet d'observations hydrologiques sur une période de 3 ans (1994 à 1996) avant qu'un aménagement en banquettes antiérosives n'ait été réalisé sur la partie la plus cultivée du bassin versant (43 % de sa superficie). Les observations hydrologiques se sont poursuivies pendant la réalisation de l'aménagement (juin 1996 à juillet 1997) puis après. Nous disposons donc, sur ce bassin versant, d'une chronique hydrologique influencée, à partir de juin 1996, par la création d'un nouvel aménagement anti-érosif.

Cette étude est menée en utilisant le modèle H2U (CUDENNEC et DUCHESNE 1997 ; DUCHESNE *et al.*, 1997), Hydrogramme Unitaire Universel, comme outil d'analyse hydrologique, pour identifier les modifications de la réponse hydrologique à des aménagements de l'espace rural.

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Le bassin versant d'El Gouazine

Le petit bassin versant d'El Gouazine, d'une superficie de 18,1 km², se situe à 15 km de la délégation d'Oueslatia, dans le gouvernorat de Kairouan au centre de la Tunisie (figure 1). Avec une pluviométrie moyenne interannuelle proche de 400 mm (411 mm à Oueslatia) et une évapotranspiration potentielle annuelle de 1680 mm, le climat de la région est de type semi-aride. Un lac collinaire, créé en 1990, d'une capacité initiale de stockage égale à 233 370 m³, sert d'exutoire au bassin versant et de station de mesure des écoulements superficiels.

L'altitude du bassin est comprise entre 575 m au sud et 375 m au nord (figure 2), à son exutoire. La pente moyenne longitudinale de ce bassin très allongé est de 1,8 %. Sa pente transversale, nettement plus élevée que la pente longitudinale, dépasse 5 %. Les formations géologiques sont caractérisées par la présence d'un substratum marno-calcaire dans la partie sud-est du bassin versant et d'un substratum argilo-gréseux dans la partie nord-ouest.

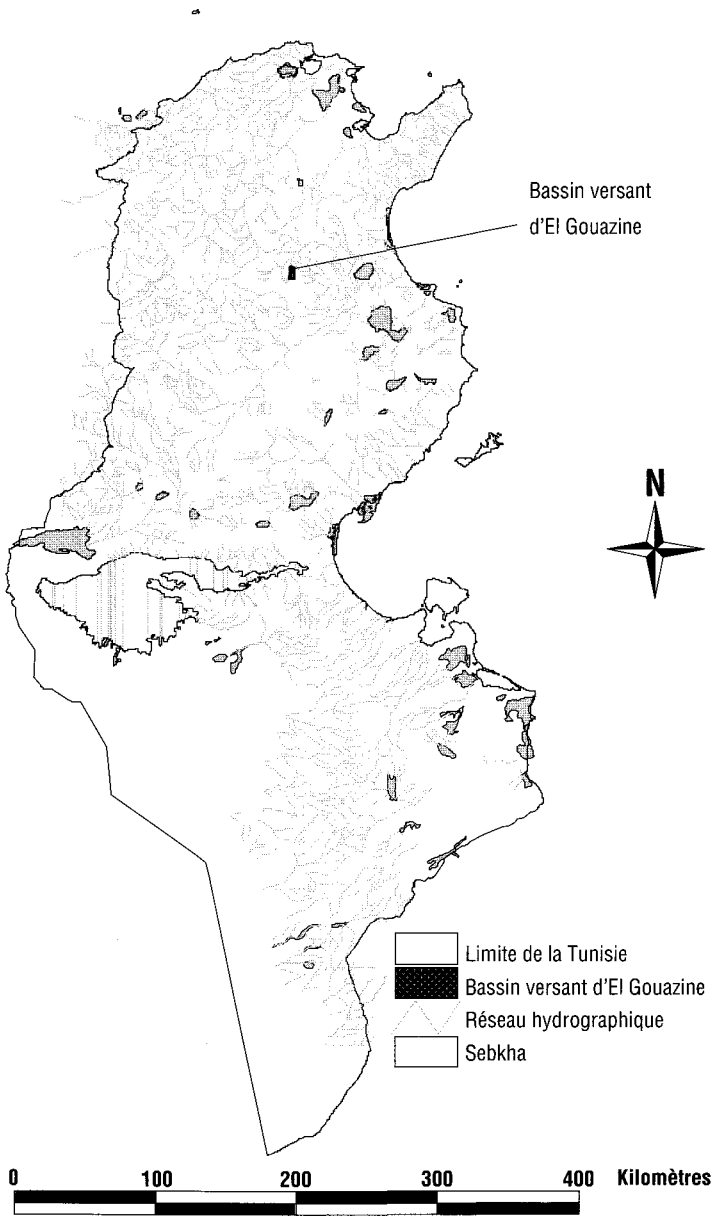


Figure 1 Localisation du petit bassin versant d'El Gouazine.
Situation of the El Gouazine Catchment.

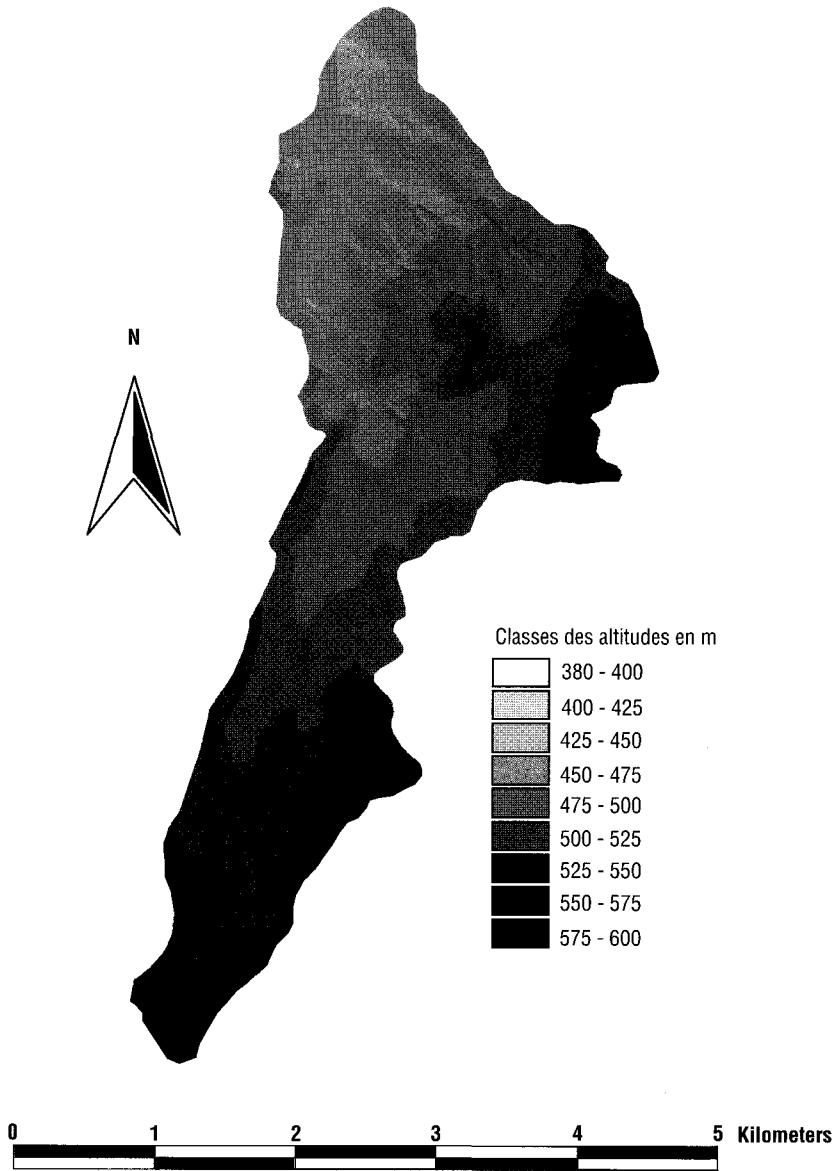


Figure 2 Topographie du bassin versant d'El Gouazine.
Topography of the El Gouazine catchment.

La carte d'occupation des sols (figure 3), extraite du travail de MANSOURI (2001), révèle la répartition suivante en pourcentage de la superficie totale du bassin :

- 40 % pour les cultures céréalières en alternance avec des jachères,
- 33 % pour les parcours de garrigue (caroubiers, lentisques) et la steppe herbeuse à Alfa,
- 20 % pour les forêts de pins d'Alep (forêt dense et forêt dégradée),
- 6 % pour l'arboriculture (oliviers, amandiers)
- 1 % pour le barrage et son lac collinaire.

De juin 1996 à juillet 1997, le bassin versant d'El Gouazine a subi un terrassement mécanique sur une superficie totale de 783 ha en deux périodes successives (figures 4 et 5, photo 1) :

- 707 hectares du 17 juin au 07 décembre 1996,
- 76 hectares du 6 juin au 29 juillet 1997.

Ces banquettes sont constituées de levées en terre d'une hauteur moyenne de 1,5 m. L'écartement entre deux banquettes successives, fonction de la pente, est en moyenne de 25 m. Cet aménagement a intéressé principalement les terres de culture et une partie des parcours dégradés afin de les transformer en terres cultivées, soit environ 43 % de la superficie totale du bassin. Ces banquettes ont été faites de façon à éviter tout ruissellement; elles sont dites « banquettes à rétention totale ». Chaque élément de banquette a une longueur de 100 m et une section transversale moyenne de 2,28 m² en amont de la banquette, soit une capacité de rétention maximale égale à 228 m³. L'aménagement réalisé de juin 1996 à juillet 1997 sur le bassin versant d'El Gouazine ayant une longueur totale de 117 540 mètres linéaires, il correspond à une capacité maximale de stockage d'environ 257 640 m³ d'eau de ruissellement, soit un peu plus que la capacité de rétention maximale de la retenue du lac El Gouazine.



Photo 1

Un élément de banquette rempli d'eau (NASRI S., septembre 1998).

A single contour ridge element filled with water (NASRI S., September 1998).

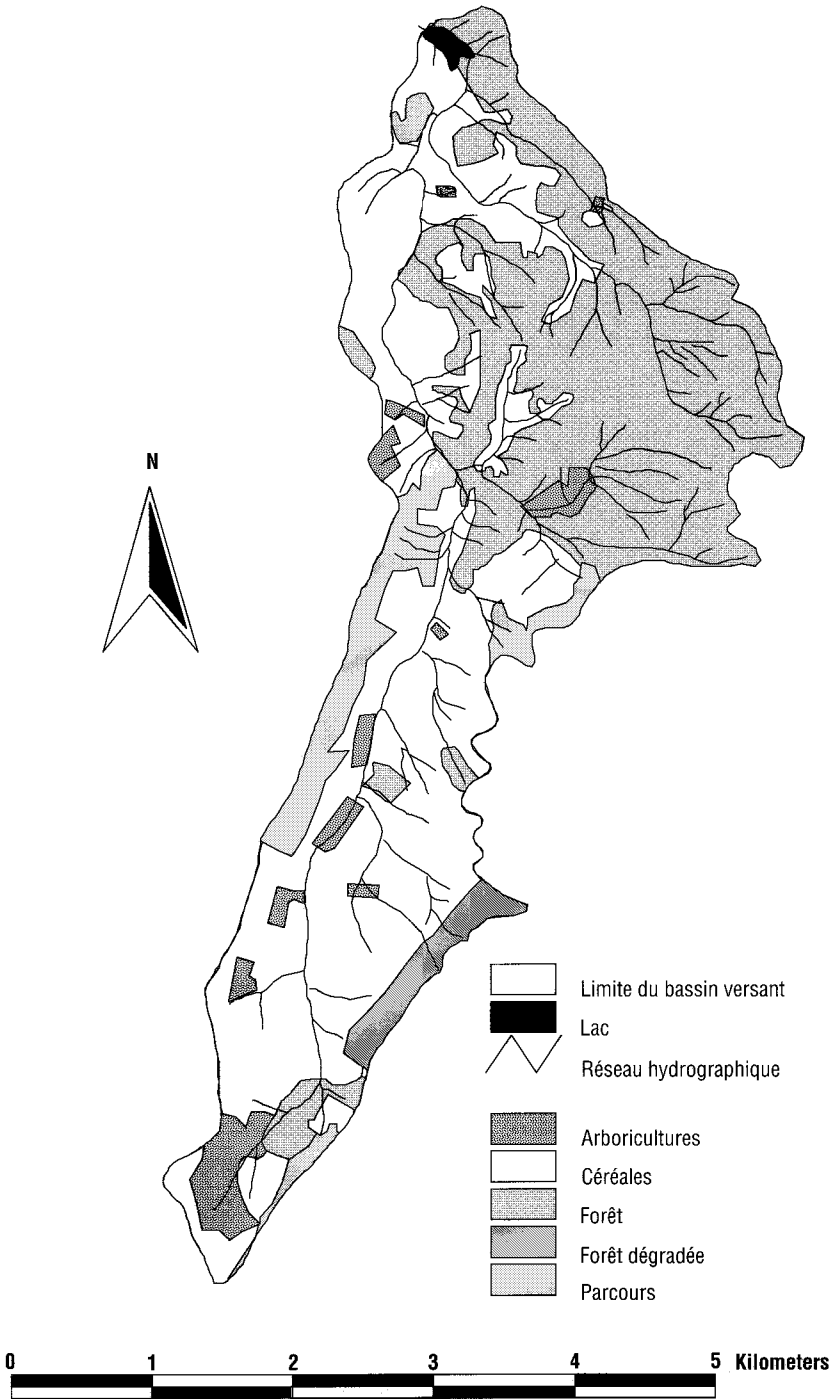


Figure 3 Carte d'occupation des sols du bassin versant d'El Gouazine.
Land use within the El Gouazine catchment.

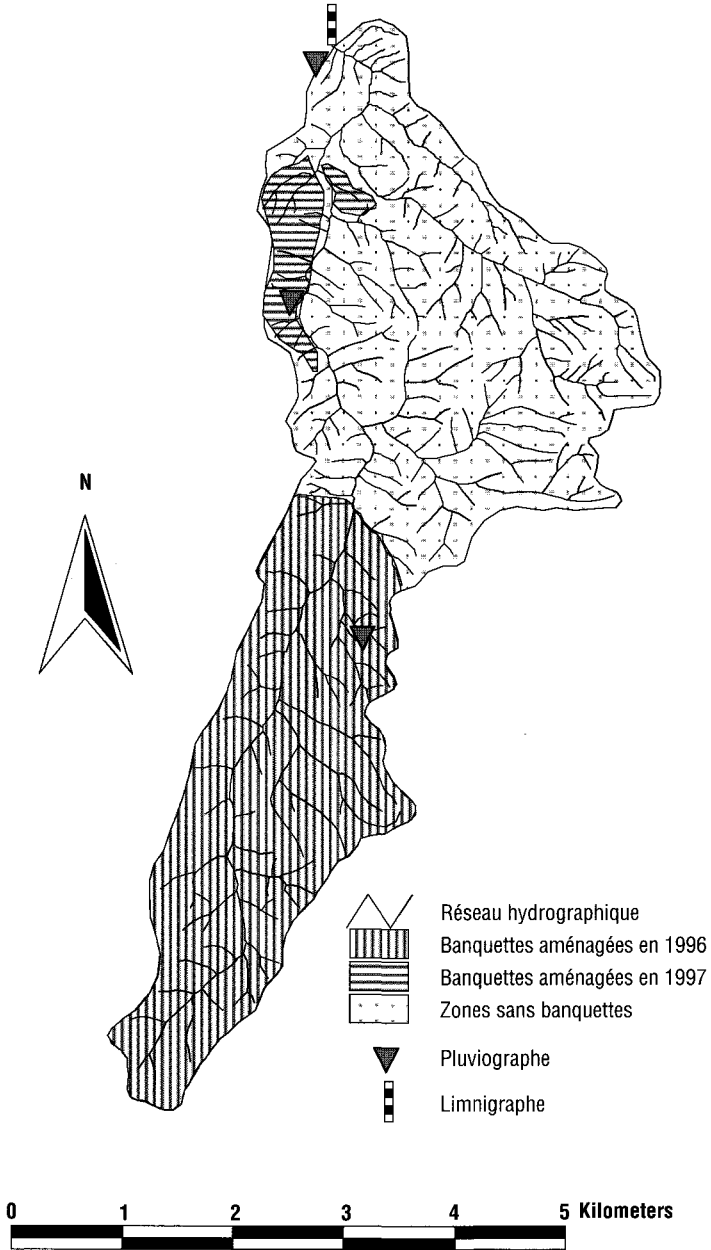


Figure 4 Localisation des aménagements en banquettes réalisés de juin 1996 à juillet 1997 sur le bassin versant d'El Gouazine.

Localisation of contour ridges introduced in the El Gouazine catchment between June 1996 and July 1997.

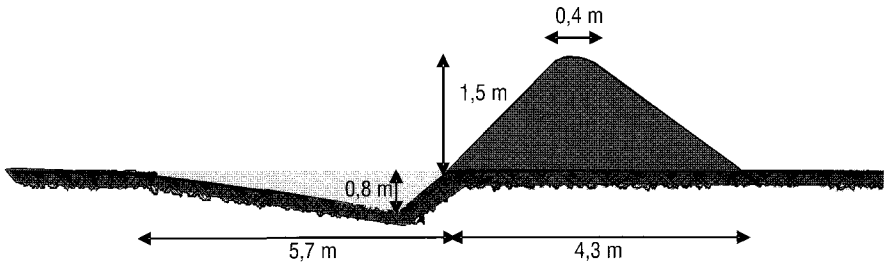


Figure 5 Schéma d'une coupe transversale de banquette.
Schematic transversal section of a contour ridge.

2.2 Les observations hydrologiques

Depuis octobre 1993, le petit barrage d'El Gouazine est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviographe et d'un limnigraphe. Le capteur pluviométrique à augets basculeurs (1 basculement est égal à 0,5 mm de pluie) et la sonde immergée au fond de la retenue, qui mesure le niveau d'eau au cm près, sont reliés à deux centrales d'acquisition automatique des données (D/CES-IRD, 1996-1999).

En avril 1994, un bac à évaporation de type Colorado (bac enterré de surface 1 m²) et un pluviomètre ont été installés au sommet de la digue en terre. Depuis cette date, un observateur y effectue des mesures quotidiennes de pluie et d'évaporation. En octobre 1998, deux pluviographes ont été installés dans la partie amont du bassin versant afin de compléter le dispositif pluviométrique.

Des bathymétries du lac et des nivellements fins de la cuvette ont été effectués en 1993, 1996, 1997 et 1998 (D/CES-IRD, 1996-1999). Ces mesures ont permis de faire l'historique de l'envasement de la retenue et d'établir les relations « hauteur-volume » et « hauteur-surface » utilisées dans les calculs des bilans d'eau de la retenue.

Au cours d'une crue, l'équation du bilan d'eau de la retenue prend la forme suivante (ALBERGEL et REJEB, 1997 ; ALBERGEL et NASRI, 2001) :

$$\Delta V = (\Delta VP + \Delta VR) - (\Delta VI + \Delta VD) \quad (1)$$

où ΔV est la variation de volume stocké dans la retenue sur l'intervalle de temps Δt ,

ΔVP est le volume pluviométrique tombé sur la retenue pendant l'intervalle de temps Δt ,

ΔVR est le volume ruisselé pendant le même intervalle de temps,

ΔVI est le volume infiltré pendant l'intervalle de temps Δt ,

ΔVD est le volume déversé pendant le même intervalle de temps.

L'évacuateur de crues, dont la cote de déversement est égale à 8,28 m aux échelles limnimétriques, a été aménagé en 1994 d'un seuil déversant qui permet l'estimation des débits déversés avec une précision satisfaisante, pour les crues survenues entre le 20 et le 24 septembre 1995, seules crues ayant déversé depuis la construction du barrage.

Pour le calcul des volumes infiltrés nous avons utilisé une équation simplifiée du bilan hydrologique de la retenue en période sèche en l'absence de prélèvement dans la retenue :

$$\Delta V = \Delta VI + \Delta VE \quad (2)$$

où : ΔVI est le volume infiltré pendant l'intervalle de temps Δt ,

ΔVE est le volume évaporé pendant l'intervalle de temps Δt .

L'utilisation de cette équation simplifiée conduit aux résultats présentés dans le tableau 1 et la figure 6.

Les volumes infiltrés ont ainsi été estimés à 120 m³ par jour pour une cote du plan d'eau égale à 4 m, 200 m³ par jour à la cote 5 m, 460 m³ par jour à la cote 7 m.

Tableau 1 Taux d'infiltration à partir du lac El Gouazine pendant différentes périodes 1994-1999.

Table 1 Infiltration rate from the El Gouazine lake for different periods from 1994 to 1999

Période	Cote de l'eau dans le lac (m)	Volumes (infiltrés+évaporés) (m ³)	Évaporation Pan (m ³)	Infiltration (m ³ /jour)
01-Dec-94 – 31-Juill-95	7,34 – 4,82	123200	68488	226
01-Nov-95 – 30-Nov-95	7,64 – 7,39	22654	8938	457
01-Jun-96 – 31-Aut-96	7,56 – 6,18	87101	37967	535
01-Oct-96 – 31-Mars-97	6,41 – 4,36	75007	25248	273
01-Avr-97 – 31-Mai-97	4,36 – 3,64	11091	5343	94
01-Nov-97 – 31-Dec-97	5,16 – 4,59	20043	3382	275
01-Jan-98 – 30-Avr-98	4,59 – 3,29	19118	4556	121
01-Oct-98 – 31-Dec-98	6,89 – 6,07	46386	13963	353
01-Fev-99 – 31-Aut-99	7,26 – 4,60	123509	46552	363

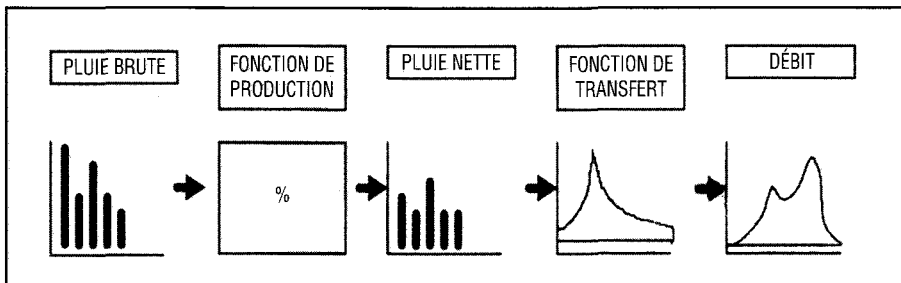


Figure 6 Articulation d'un modèle pluie-débit (d'après CUDENNEC ;1997).
Rainfall-runoff model structure (CUDENNEC, 1997).

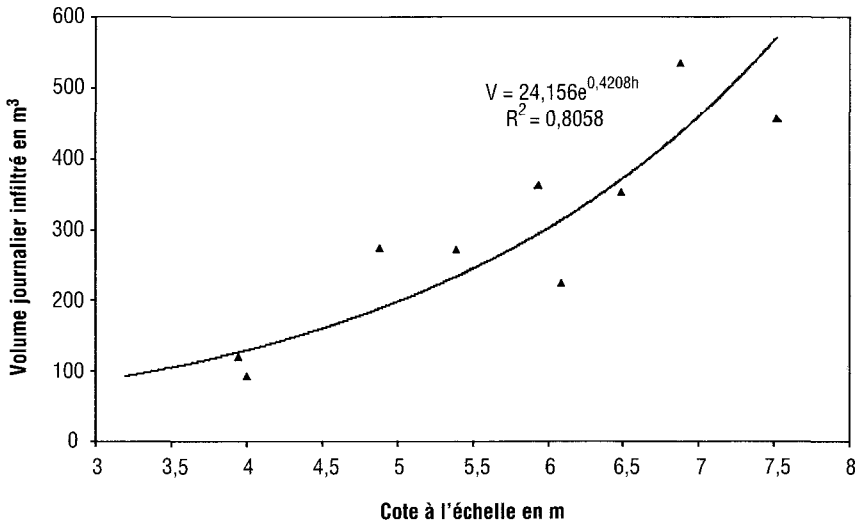


Figure 7 Volume journalier infiltré en fonction de la cote à l'échelle, lac collinaire El Gouazine.
Infiltrated daily volume according to the water level of the El Gouazine lake.

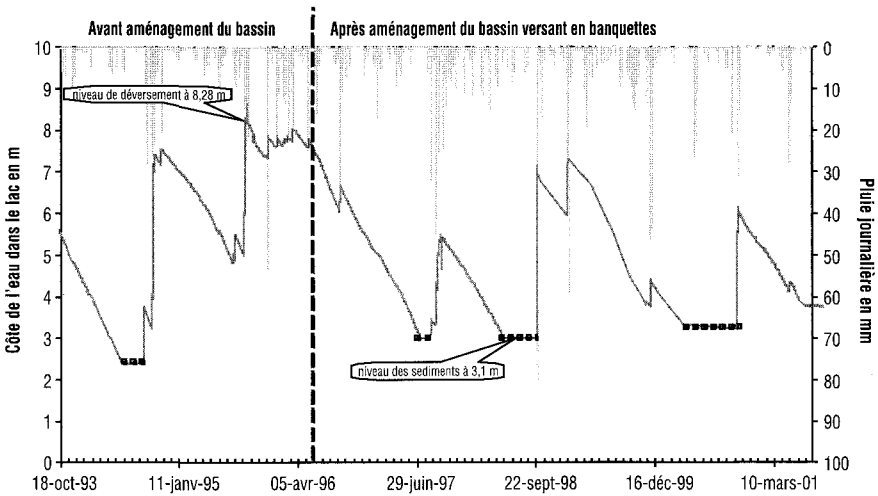


Figure 8 Variations des niveaux d'eau du lac collinaire d'El Gouazine de 1993 à 2001.
Water level variations for the El Gouazine lake from 1993 to 2001.

La figure 8 présente l'évolution des niveaux d'eau de la retenue d'El Gouazine d'octobre 1993 à septembre 2001.

2.3 Le modèle H2U

H2U est un modèle conceptuel (CUDENNEC et DUCHESNE, 1997 ; DUCHESNE et al., 1997 ; NASRI et al., 2001), qui s'articule classiquement autour :

- d'une fonction de production qui définit la pluie nette (lame ruisselée) à partir de la pluie brute (hauteur d'eau précipitée sur le bassin versant),
- d'une fonction de transfert basée sur la définition la plus complète possible du réseau hydrographique et des trajets suivis par l'eau à la surface du bassin versant (CUDENNEC, 1999, 2000).

La fonction de production définie par NASRI et al. (2001) calcule la pluie nette sur chaque intervalle de temps (5 mn) en considérant :

- la pluie d'imbibition P_i qui correspond à la quantité de pluie nécessaire à l'apparition de l'écoulement,
- la pluie interceptée P_s qui correspond à un seuil d'intensité de pluie limite du ruissellement S , supposé constant au cours de l'averse,
- la pluie efficace P_e , différence entre la pluie brute et la somme de la pluie d'imbibition et de la pluie interceptée,
- le coefficient de ruissellement efficace K , rapport de la pluie nette P_n et de la pluie efficace.

Trois paramètres permettent de calibrer la fonction de production : P_i , S et K . La pluie d'imbibition est calculée par itération pour que l'hydrogramme calculé commence de manière simultanée avec l'hydrogramme observé. Le seuil d'intensité de pluie S et le coefficient de ruissellement efficace K sont optimisés sur les volumes de crue observés.

La théorie développée par DUCHESNE et al. (1997) aboutit à la description du bassin versant par une fonction de densité des distances à l'exutoire des différents points du bassin versant. Ces distances tiennent compte des chemins suivis par l'eau au cours du ruissellement et la fonction de densité présente la forme suivante :

$$u(t) = \left(\frac{n}{2t}\right) \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left(\frac{n \cdot t}{2 \cdot t}\right)^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n \cdot t}{2t}} \quad (3)$$

Où

L est le chemin hydraulique en m,

\bar{L} est le chemin hydraulique moyen en m,

Γ symbolise la fonction gamma,

En supposant que la vitesse d'écoulement varie modérément autour d'une valeur moyenne \bar{V} (en m/s), la fonction de densité des chemins hydrauliques se transforme en fonction de densité des temps de parcours qui constitue l'Hydrogramme Unitaire Universel $u(t)$:

$$\rho(L) = \left(\frac{n}{2L}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot L^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{n \cdot L}{2\bar{L}}} \quad (4)$$

L'application du modèle H2U revient à calculer le produit de convolution :

$$Q(t) = S \cdot \int_0^t i_{nette}(\tau) \cdot u(t - \tau) \cdot d\tau \quad (5)$$

où S est la surface du bassin versant en m^2 ,

i_{nette} est la pluie nette en m .

La reconstitution des crues à l'aide du modèle H2U consiste donc à effectuer les opérations suivantes :

- calculer la pluie nette sur chaque intervalle de temps (5 mn) à partir de la pluie brute,
- calculer l'hydrogramme affin de l'hydrogramme unitaire pour chaque intervalle de temps,
- cumuler les débits résultants selon le principe d'additivité des hydrogrammes élémentaires.

Nous utiliserons dans un premier temps le modèle H2U pour la reconstitution des crues du bassin versant d'El Gouazine avant la réalisation de l'aménagement antiérosif en banquettes, c'est-à-dire avant juin 1996. Puis, après calage et validation du modèle sur cette période ayant précédé l'aménagement, nous réutiliserons les mêmes règles de calage des paramètres pour la période postérieure à l'aménagement (après juin 1996). Pour cette dernière période, nous mettrons en évidence l'impact de l'aménagement sur le ruissellement à l'échelle du bassin versant par la comparaison de l'hydrogramme reconstitué avec les règles de calage antérieures à l'aménagement et de l'hydrogramme observé. Entre septembre 1993 et décembre 1997 nous disposions d'un seul pluviographe installé sur la digue à l'exutoire du bassin versant (figure 4). Depuis janvier 1998 nous disposons de deux autres pluviographes installés dans les parties médiane et aval du bassin versant.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Impacts des banquettes sur les apports annuels

Le tableau 2 présente les résultats du calcul des bilans d'eau de la retenue d'El Gouazine par année hydrologique de septembre 1994 à août 2000. En Tunisie, l'année hydrologique commence en effet au mois de septembre pour se terminer au mois d'août de l'année suivante. L'examen de ce tableau montre que pour des années à faible pluviométrie (300 mm) avant (94-95) et après aménagement (96-97 ; 99-2000), l'écoulement du bassin versant est 8 à 20 fois plus faible après aménagement, malgré une pluie journalière maximale nettement plus forte au cours des années 96-97 et 99-2000. Il montre également que des crues de même volume sont obtenues pour des averses de 30 mm avant aménagement (année 94-95) et de 80 mm après aménagement (année 98-99).

Tableau 2 Bilan des apports d'eau par ruissellement avant et après aménagement en banquettes du bassin versant d'El Gouazine.

Table 2 *Rainfall-runoff balances before and after introducing contour ridges in the El Gouazine catchment*

	Avant aménagement			Après aménagement		
	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-2000
Année	94-95	95-96	96-97	97-98	98-99	99-2000
Pluie annuelle en mm	299	576	245	339	408	304
Volume ruisselé en m ³	236 310	478 316	35 438	75 778	200 496	11 680
Nombre de crue	7	15	2	4	3	2
Volume de la crue maximale en m ³	128 800	150 000	30 634	22 219	128 000	6 422
Pluie de la crue maximale en mm	30	27	51	25	80	56

Dès le mois de septembre 1996, les fortes pluies provoquent des ruissellements qui, sur la partie aménagée du bassin versant d'El Gouazine, sont interceptés par les levées de terre. Sur cette partie aménagée, les eaux superficielles n'atteignent l'oued principal qu'après avoir rempli les banquettes. Les apports d'eau dans le lac ont tendance à baisser de manière suffisamment importante pour qu'une analyse précise des conditions du ruissellement soit entreprise à l'échelle du bassin versant. Cette analyse vise à comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin versant avant et après son aménagement.

3.2 Calage et validation du modèle H2U avant aménagement

Les données géomorphologiques du bassin versant d'El Gouazine ont été extraites d'une carte topographique au 1/50 000 conformément au protocole mis au point par CUDENNEC (1999) avec le logiciel d'information géographique ERDAS IMAGINE de ESRI. La fonction de densité des longueurs des chemins hydrauliques a été calculée à partir d'une grille de points quadrata séparés par une distance de 10 mètres. La figure 9a présente le résultat de la définition des chemins hydrauliques effectuée à partir de la carte topographique au 1/50 000 du Jebel Serj et la figure 9b présente la fonction de densité des chemins hydrauliques et sa modélisation par ajustement d'une fonction gamma.

Les crues observées à l'exutoire du bassin versant d'El Gouazine avant le mois de juillet 1996 sont consignées sur le tableau 3.

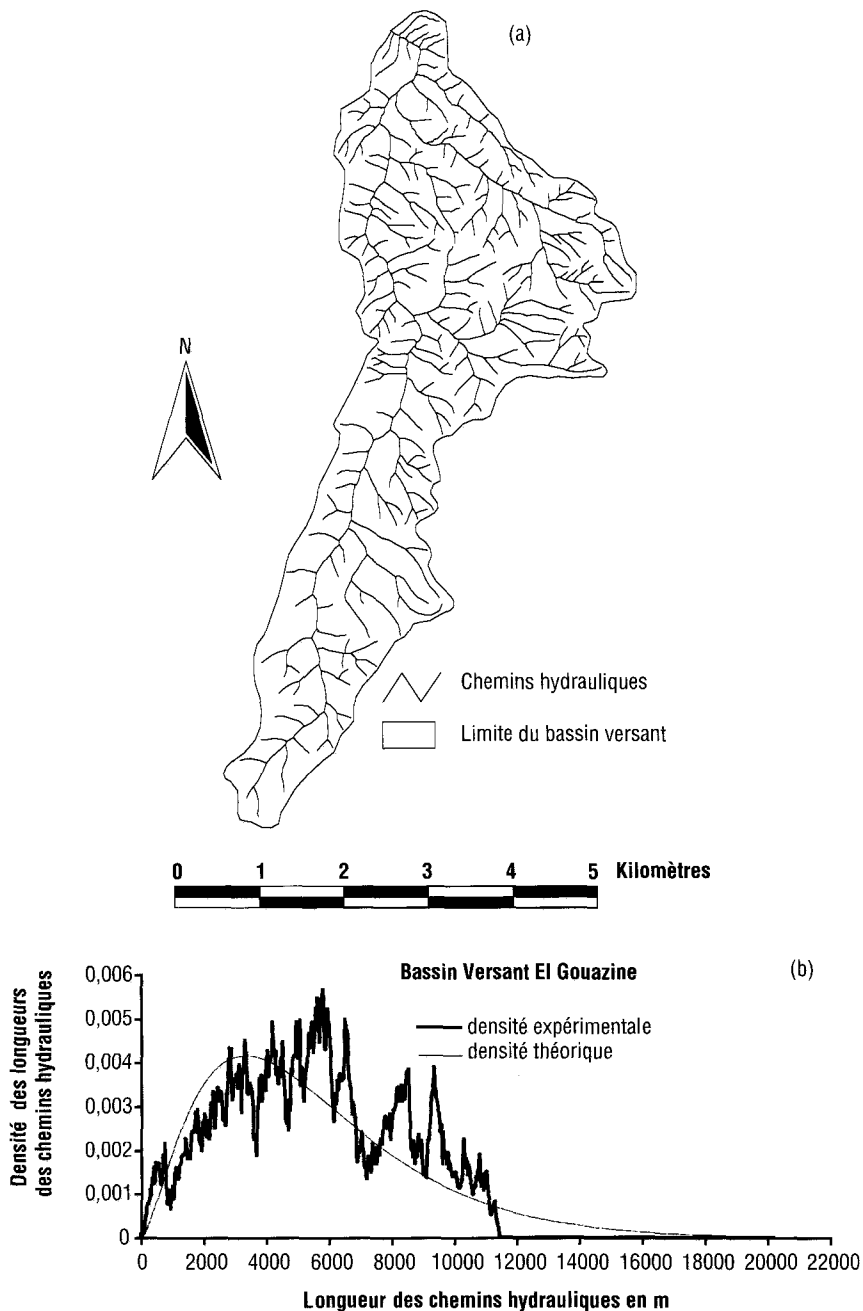


Figure 9 (a) Les chemins hydrauliques du bassin versant d'El Gouazine et (b) leurs fonctions de densité expérimentale et théorique.

El Gouazine catchment drainage system and (b) actual and theoretical water course length probability density functions for the El Gouazine catchment.

Tableau 3 Crues enregistrées avant aménagement du bassin versant d'El Gouazine en banquettes.

Table 3 Observed flow characteristics before introducing contour ridges in the El Gouazine catchment.

Date de la crue	Pluie totale (mm)	Intensité maximale en 30mn (mm.h ⁻¹)	Volume ruisselé (m ³)	Débit maximal (m ³ .s ⁻¹)	Coefficient de ruissellement (%)	Temps de réponse (mn)
30/09/1994	11,5	23	11306	5,56	5,5	26
03/10/1994	32,5	17,4	122250	28,83	20,8	70
04/11/1994	20	16	26000	8,33	8,6	75
13/09/1995	12	21,2	28000	10,08	12,9	45
20/09/1995	26,5	27,6	136440	35	28,5	25
22/09/1995	19,5	18	109280	9,67	31,0	30
24/09/1995	21	31	14985	6,67	4,0	28
10/12/1995	13,5	26,2	2015	3,44	1,3	75
13/01/1996	24	6,8	15521	2,22	3,6	190
15/02/1996	10,5	18,8	8750	3,33	4,6	55
27/02/1996	22,5	5	5091	0,61	1,2	240
12/05/1996	17	21	13500	2,33	4,4	45

L'ajustement des trois paramètres de la fonction de production et de la fonction de transfert du modèle H2U donne les résultats consignés sur le tableau 4.

Tableau 4 Valeurs des paramètres du modèle H2U pour le bassin versant d'El Gouazine avant aménagement (juin 1996).

Table 4 H2U Model parameter values for the El Gouazine catchment before introducing contour ridges.

	Pluie d'imbibition	Pluie interceptée (seuil d'intensité)	Coefficient de ruissellement efficace	Temps moyen de parcours
Unités	mm	mm.h ⁻¹	%	mn
Moyenne	9,6	3,6	42,3	39,6
Médiane	8,0	3,6	36,0	46,0
Écart-type	3,2	1,2	23,4	17,8

N.B. : La longueur moyenne (\bar{L}) des chemins de l'eau est de 5551 m et l'ordre du bassin (n) égal à 5.

Pour tester l'ajustement du modèle, nous avons utilisé les valeurs médianes des paramètres de calage et calculé les valeurs des trois critères suivants :

1 – Le critère de Nash appliqué aux débits ruisselés (NASH et SUTCLIFFE, 1970) ;

$$C_{Nash} = 1 - \frac{\sum (Q_c - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_m)^2} \quad (6)$$

2 – L'écart relatif entre les lames ruisselées calculées et observées :

$$C_{Lr} = \frac{Lr_c - Lr_o}{Lr_o} \quad (7)$$

3 – L'écart relatif entre les débits maxima calculés et observés :

$$C_{Q_{max}} = \frac{Q_{max_c} - Q_{max_o}}{Q_{max_o}} \quad (8)$$

L'examen du tableau 5 montre que les deux derniers critères sont excellents aussi bien en calage qu'en validation. Ils révèlent ainsi la bonne adéquation du modèle H2U pour la reconstitution des volumes ruisselés et des débits maximum. Les valeurs du critère de NASH sont également bonnes. Elles varient d'une crue à l'autre (0,62 à 0,96) et révèlent le plus ou moins grand décalage (5 à 20 minutes) entre les pointes des crues calculées et observées.

Tableau 5 Critères d'ajustement du modèle H2U.

Table 5 Fitting criteria for the H2U model.

Calage du modèle H2U			
Date de la crue	C_{Nash}	CL_r	CQ_{max}
03-10-1994	0,72	-0,0043	-0,005
04-11-1994	0,91	0	0,002
13-09-1995	0,64	0	-0,017
22-09-1995	0,62	0,00033	0,003
13-01-1996	0,80	-0,0012	0,023
Validation du modèle H2U			
20-09-1995	0,96	0,0017	0,058

La figure 10 présente le résultat de la validation du modèle H2U à la reconstitution de la crue du 20 septembre 1995. Pour cette crue, les trois critères d'ajustement sont excellents.

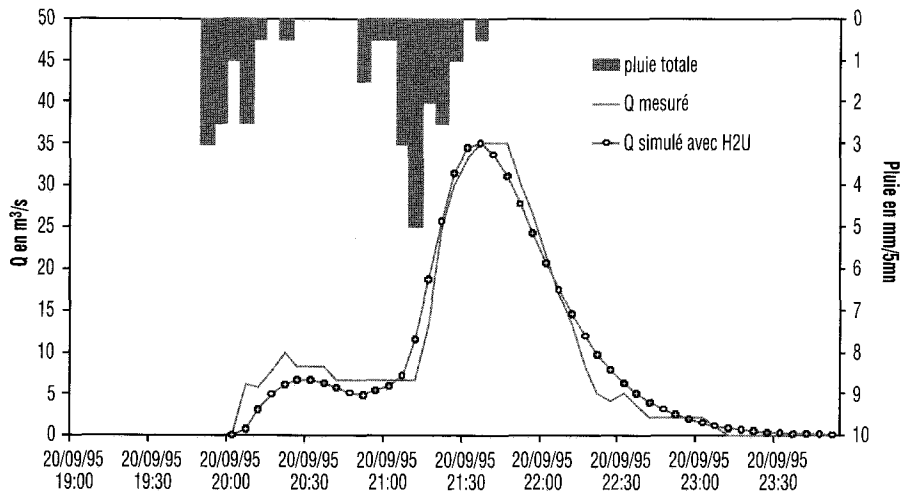


Figure 10 Hydrogrammes observé et reconstitué avec le modèle H2U de la crue du 20-09-1995 à l'exutoire du bassin versant d'El Gouazine.

Observed and simulated runoff using the H2U model on the El Gouazine catchment for flows of September 20, 1995.

3.3 Application du modèle H2U après aménagement

Le tableau 6 présente les crues du bassin versant d'El Gouazine après aménagement.

Tableau 6 Comparaison des propriétés des ruissellements avec banquettes (observés) et sans banquettes (simulés).

Table 6 *Comparison between runoff characteristics with contour ridges (observed) and without contour ridges (simulated).*

Date	Pluie totale (mm)	Intensité maximale en 30 mn (mm.h^{-1})	Volume ruisselé (m^3)		Débit maximal ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)		Coefficient de ruissellement (%)		Temps de réponse (mn)	
			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
			Avec bqttes	Sans bqttes	Avec bqttes	Sans bqttes	Avec bqttes	Sans bqttes	Avec bqttes	Sans bqttes
09/09/1996	50	29,0	16 500	265 800	5,3	38,1	1,8	29,4	105	25
18/08/1997	32	36,8	2 400	191 600	2,8	38,1	0,4	33,1	105	25
05/09/1997	44	36,0	7 000	275 900	0,2	44,4	0,9	34,6	90	20
06/09/1997	22	11,8	5 600	80 800	0,9	38,0	1,4	20,3	155	20
14/09/1997	25	44,0	20 600	114 100	1,0	10,6	4,6	25,2	180	30
02/10/1997	24	40,2	23 500	132 500	4,3	33,6	5,4	30,5	65	25
24/09/1998	80	54,0	128 000	510 000	5,3	41,2	8,8	35,2	85	25
15/01/1999	43	11,0	2 500	156 400	25,3	73,2	0,3	20,1	85	20
17/01/1999	20	9,8	2 300	56 800	0,1	12,4	0,6	15,7	240	25
19/01/1999	60	9,6	6 000	70 000	0,4	9,7	0,6	6,4	145	20
27/11/1999	62	10,8	6 700	176 600	1,4	27,6	0,6	15,7	105	20
30/11/1999	19	6,0	1 200	25 000	0,2	7,3	0,3	7,3	240	25

(1) Avec bqttes : avec banquettes.

(2) Sans bqttes : sans banquettes.

Pour mieux montrer l'effet de l'aménagement antiérosif en banquettes sur le ruissellement du bassin versant d'El gouazine, nous avons comparé deux crues avant et après aménagement de mêmes caractéristiques pluviométriques (hauteur totale de la pluie, intensité maximale,...) : l'une le 20 septembre 1995 avant aménagement du bassin versant en banquettes mécaniques, l'autre le 5 et 6 septembre 1997, après aménagement du bassin versant.

Sur la figure 10, on constate que la pluie du 20 septembre 1995 (27 mm ; 28 mm/h) a provoqué très rapidement un ruissellement après un temps de réponse de 35 mn. Le débit maximal de la crue, très élevé, est égal à 35 m³/s. Le volume d'eau apporté par cette crue fut très important, égal à 278 580 m³. Cet apport a suffi à remplir le lac et provoqua un déversement.

Sur la figure 11, on constate que la pluie du 5 au 6 septembre 1997 (44 mm ; 36 mm/h) a provoqué un ruissellement différé avec un débit maximal de 1,64 m³/s, très faible par rapport au précédent. Le volume d'eau généré par cette crue et recueilli dans la retenue ne fut que de 6 940 m³. L'application du modèle H2U aux averses survenues du 5 au 6 septembre 1997, avec les valeurs des paramètres correspondant à la période ayant précédé l'aménagement du bassin versant en banquettes (tableau 4), fournit sur la même figure 11 les hydrogrammes des crues tels qu'ils auraient pu être observés en l'absence d'aménagement. Le volume total ruisselé aurait été de l'ordre de 276 000 m³ et le débit maximal de 38 m³.s⁻¹.

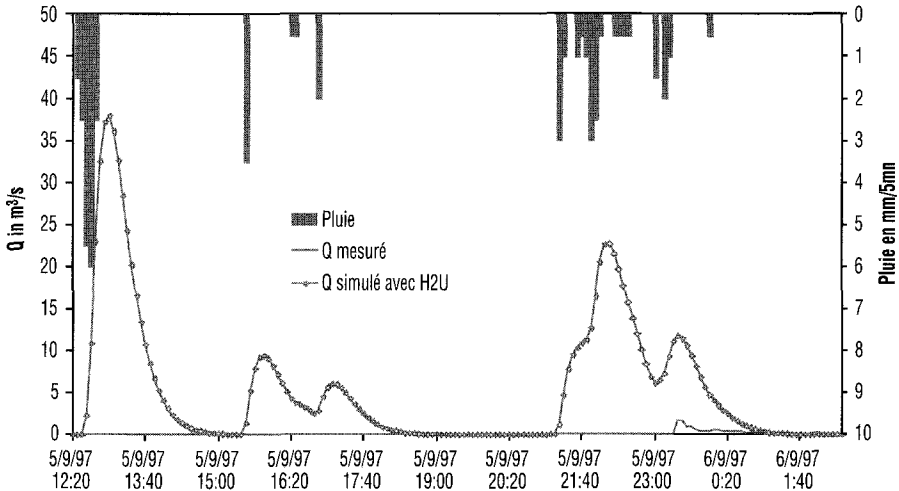


Figure 11 Crues du 5 au 6 septembre 1997 sur le bassin versant d'El Gouazine. *Observed and simulated runoff without contour ridges on the El Gouazine catchment for september 5-6, 1997.*

3.4 Discussion

Les banquettes construites de juin 1996 à juillet 1997 dans le bassin versant d'El Gouazine sont à rétention totale. Compte tenu de leurs caractéristiques, leur capacité totale de stockage a été évaluée à environ 260 000 m³. Elles ne concernent que 43 % de la superficie du bassin versant (figure 4).

En comparant les crues du bassin versant d'El Gouazine avant et après aménagement (figures 10 et 11), nous pouvons donc conclure que les zones cultivées du bassin versant jouent un rôle majeur dans la genèse des ruissellements et que l'aménagement de ces zones cultivées a privé le barrage d'El Gouazine de la presque totalité de ses apports superficiels.

Avant l'aménagement du bassin versant en banquettes mécaniques, le coefficient de ruissellement global moyen était de 4 à 30 % pour les crues d'automne (septembre et octobre) et de 1 à 10 % pour les crues d'hiver et de printemps (novembre à mai). En effet, durant la période automnale les pluies sont généralement caractérisées par des intensités élevées tombant sur des sols peu perméables et présentant souvent des croûtes de battance. De novembre à mai, les pluies tombent sur des sols cultivés rendus perméables sous l'effet du labour (novembre à décembre) et sous l'effet du couvert végétal (mars à mai) qui favorisent l'infiltration et l'interception des eaux de ruissellement.

Depuis l'aménagement du bassin versant en banquettes mécaniques, les apports d'eau au barrage d'El Gouazine sont très faibles. À l'échelle du bassin, le coefficient de ruissellement global est de 1 à 9 % pour les crues d'automne (septembre et octobre) et de 0,3 à 0,6 % pour les crues d'hiver et de printemps (novembre à mai).

Si le modèle H2U appliqué à l'ensemble du bassin versant d'El Gouazine permet de reconstituer correctement les crues de la période antérieure à l'aménagement et de mettre en exergue le rôle des banquettes, il montre ici ses limites lorsqu'il est appliqué de manière globale. C'est en effet l'aménagement de la partie cultivée du bassin versant d'El Gouazine qui nous a révélé une forte disparité des comportements entre les secteurs cultivés (43 % de la superficie du bassin versant) et non cultivés de ce bassin. Pour reconstituer fidèlement les crues de ce bassin versant, une modélisation distribuée ou semi-distribuée semble donc nécessaire. Cette modélisation semi-distribuée est possible avec le modèle H2U en découpant le bassin en deux ou trois sous-bassins (figure 4) tenant compte de la répartition des aménagements et de l'occupation des sols, les deux premiers sous-bassins les plus proches de l'exutoire étant très majoritairement couverts de forêts, de garrigue et d'une steppe à alfa (figure 3), alors que le troisième sous-bassin très allongé, partie amont du bassin versant totalement aménagée en 1996, est majoritairement cultivé.

Une modélisation hydrologique plus complète devra chercher d'une part à quantifier le ruissellement des parties cultivées (avant et après aménagement) et non cultivées partiellement boisées, soumises à une exploitation fourragère, et d'autre part à simuler le fonctionnement hydrologique d'une cascade de banquettes (stockage, infiltration et débordement).

4 – CONCLUSION

L'association du modèle H2U, comme fonction de transfert basée sur la répartition des chemins hydrauliques sur un bassin versant, et d'une fonction de production simple, fondée sur le calcul de la pluie nette à partir de la pluie brute, a permis la reconstitution des crues sur le bassin versant d'El Gouazine avant son aménagement en banquettes. Les paramètres de calage du modèle avant aménagement du bassin versant (43 % de sa superficie) ont été utilisés pour reconstituer des crues de la période postérieure à l'aménagement afin de les comparer aux crues observées et de mettre ainsi en évidence le rôle des aménagements en banquettes sur les propriétés du ruissellement à l'échelle du bassin versant.

Nous avons ainsi constaté que les banquettes construites de juin 1996 à juillet 1997 dans la partie cultivée du bassin versant d'El Gouazine ont joué un rôle majeur sur les écoulements superficiels qui ont alimenté le lac collinaire servant d'exutoire à ce bassin versant. Elles ont provoqué en particulier une importante réduction des coefficients de ruissellement des mois de septembre et octobre pour les fortes averses (4 à 30 % avant aménagement, 1 à 9 % après aménagement). Elles ont aussi révélé le rôle majeur joué par les surfaces cultivées dans la genèse des ruissellements au cours de la période automnale.

L'aménagement en banquettes antiérosives à rétention totale, s'il permet la transformation des terres de parcours en terres de cultures (céréales, oliviers et amandier dans le cas du bassin versant d'El Gouazine) peut donc avoir des conséquences non désirées pour les agriculteurs qui utilisent, pour l'irrigation et/ou dans une nappe phréatique alimentée par un lac collinaire, l'eau stockée dans un lac collinaire. Aussi est-il nécessaire de trouver une solution de compromis entre la protection optimale des terres de culture localisées en amont, sur les versants, et la fourniture d'eau aux paysans qui utilisent l'eau stockée dans les lacs collinaires. Dans ce but, pour améliorer la gestion de l'eau de ruissellement à l'échelle du bassin versant il est possible d'envisager soit de limiter la superficie aménagée en banquettes à rétention totale, soit de réaliser des aménagements en banquettes à rétention partielle qui dévient l'eau de ruissellement vers les drains naturels, augmentant ainsi les temps de parcours et les volumes infiltrés, mais diminuant les débits maximum et les transports solides.

L'utilisation du modèle H2U après découpage du bassin versant en sous bassins homogènes du point de vue de leurs comportements hydrologiques (types de sols, occupation des terres, pratiques culturales, aménagements) devrait permettre, pour des bassins versants semblables à celui d'El Gouazine, d'une part de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du milieu et d'autre part l'évolution temporelle des états de surface afin de simuler, avant et après sa réalisation, les effets d'un aménagement en banquettes à rétention totale ou partielle. Cette nouvelle démarche impose une meilleure analyse du fonctionnement hydrologique des banquettes, les banquettes à rétention totale n'étant susceptibles de fournir un écoulement qu'après leur remplissage alors que les banquettes à rétention partielle ont pour effet de prolonger considérablement les longueurs des chemins hydrauliques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABU-ZREIG M., ATTOM M., HAMASHA N. 2000. Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan. *Agricultural Water Management* 46 (2000) 183-192.
- ACHOURI M., 1994. Small scale Water Harvesting in Tunisia. In: FAO, Water Harvesting for improved Agriculture Production. Expert Consultation, Cairo, Egypt 21-25 nov. 1993, p. 87-97, FAO, Rome.
- ALAYA K., VIERTMANN W. & WAIBEL T., 1993. Les Tabias. Editeurs: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. ISBN: 9973 - 9735 - 0 - X.
- ALBERGEL J., NASRI S., BOUFAROUA M. 1999. Small dams water balance: experimental conditions, dated processing and modelling in arid and semiarid areas. In *Proceedings of the International Seminar on Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration*. 29 June - 2 July 1998. Department of water resources engineering, Lund University, Lund, Sweden. *Report 3222*, pp 45-58.
- ALBERGEL J. & REJEB N. (1997) : Les lacs collinaires en Tunisie : Enjeux, contraintes et perspectives. CR. Acad. Agric. Fr., 1997, pp. 77-88. Séance du 19 mars 1997. Note présentée par J. ALBERGEL. Discussion pp. 101-104.
- ALBERGEL J., NASRI S. 2001. HYDROMED (2001), rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. Contrat européen INCO DC ERBIC 18CT 960091 - STD4. IRD/INR-GREF Tunis, 120 p + 6 annexes.
- CUDENNEC C., 1999. Protocole d'extraction des données géomorphologiques d'un bassin versant sous SIG. Notice de mise en œuvre. ENSAR, Rennes, 26 p.
- CUDENNEC C., 2000. Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse, ENSAR, Rennes, 198 p + annexes.
- CUDENNEC C., DUCHESNE J. 1997. Le modèle H2U état de l'art : une modélisation déterministe de la transformation de la pluie en débit. Rapport interne, Laboratoire de physique des surfaces naturelles et de génie rural ENSA de Rennes, 35 p.
- DCES/IRD (1996 à 2000) *Annuaire Hydrologiques des lacs collinaires de Tunisie*. Ministère de l'agriculture, Tunisie.
- DUCHESNE J., CUDENNEC C., CORBIERRE V. 1997. Relevance of H2U models to predict the discharge of a drainage basin Waterrn: *itex 97, Proceedings of the fourth international symposium on system analysis and computing in water quality management*, Québec, Canada, 17-20 Jun 1997, pp 265-272.
- EL AMAMI S., 1984. Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. Centre de Recherche du Génie Rural, Tunisia, Tunisia.
- ENNABLI N., 1993. Les aménagements hydrauliques en Tunisie. Institut National Agronomique de Tunisie.
- EVENARI M., SHANAN L., TADMOR N.-H. 1971. The Negev: the challenge of a Desert. Boston Harvard University Press, pp 221-228.
- FARHAT H, BOUFAROUA M. 1999. National strategy of soil and water conservation in Tunisia. In *Proceedings of the International Seminar on Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas, an expert meeting within the EU-INCO collaboration*. 29 June - 2 July 1998. Department of water resources engineering, Lund University, Lund, Sweden. *report 3222*, pp 231-253.
- GILL M.-A. 1998. Crop Productivity Enhancement through Rainwater Harvesting in Pakistan. In *Proceedings of the International Symposium and Second Chinese National Conference on Rainwater Utilisation*. September 8-12, 1998 Xuzhou, Jiangsu Province, China, pp 456-468.
- MANSOURI T., 2001. Apport de la modélisation hydrologique spatialisée à la connaissance des écoulements et des transports solides. Université de Tunis II (Bourse IRD).
- MEROT Ph., GASCUEL-ODOUX C., WALTER C., ZHANG X. et MOLENAT J., 1999. Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement

- de l'eau de surface. *Revue des Sciences de l'eau, Rev. Sci. Eau* 12/1(1999) 23-44.
- MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE TUNISIE, 1993. Stratégie Nationale de la Conservation des Eaux et du Sol 1990-2000. Copie revue et modifiée.
- NASH J.-E., SUTCLIFFE J.C. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principle. *Journal of Hydrology* 10: 282-280.
- NASRI S., ALBERGEL J., DUCHESNE J., BERNDTSSON R. 2001. Application of a geomorphologic model for simulation of an exceptional inflows in a small dam. In international seminary, Montpellier 11-13 October 2000, « Hydrology of Mediterranean Regions ». *PHI-V Technical Documents in Hydrology* 51, pp 129-139.
- ORAN G., BEN ACHER J., ISSAR A., & BOERS Th.-M., 1983. Economic evaluation of water harvesting in microcatchments. *Water Resources Researches*. 19:1099-1105.
- OWEIS T. & PRINZ D., 1994. Identification of Potential Water Harvesting For Improved Agricultural Production. Expert Consultation, Cairo, Egypt 21-25 Nov. 1993, p. 97-101, FAO, Rome.
- OWEIS T. & TAÏMEHA., 1994. Overall Evaluation of On-Farm Water Harvesting Systems in the Arid Regions. In: Lacirignola, C. and A. Hamdy (eds). Proceedings, CIHEAM Conference « Land and Water Ressources Management in the Mediterranean Region » 4-8 september, 1994, Valencano (Bari), Vol. III, p. 763-781.
- PRINZ D., 1995. Water harvesting in the Mediterranean environment – its past role and future prospects. In : Tsiourtis, N. (ed), *Water Resources Management in the Mediterranean Under Drought or Water Shortage Conditions*. Proceedings, International Symposium, Nicosia, Cyprus 14-18.03.1995, pp. 135-144, Balkema, Rotterdam.
- PRINZ D., 1999. Water harvesting techniques in the Mediterranean region. In: R. Berndtsson (Ed.), *Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas*, ORSTOM/Hydromed-SAREC-NFR-Lund Univ., Lund, Sweden, Report 3222, 151-163.
- QURESHI Z.-A., WILLARDSON L.-S. 1995. Increasing Soil Moisture and Crop Production by Efficient Water Harvesting Technique. In Ashraf, MM, Anwar M. *Proceedings of the Regional Workshop on Sustainable Agriculture in Dry and Cold Mountain Areas*. Islamabad: Pakistan Agricultural Research Council and ICIMOD, pp 161-169.
- SHANAN L., TADMOR N.-H., EVENARI M., REINIGER P. 1970. Runoff farming in the desert. III Micro-catchments for improvement of desert range. *Agronomy Journal* 62: 445-448.
- STRAHLER A.-N. 1952. Hypsometric analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63: 117-142.
- TOBBI B., 1994. Water Harvesting: Historic, Existing and Potentials in Tunisia. In FAO, *Water Harvesting For Improved Agricultural Production*. Expert Consultation, Cairo, Egypt 21-25 Nov. 1993, FAO, Rome.
- ZHIPING W., WANJUN Z., YONGHUI Y. 1998. Consideration on Rainwater Catchment and Utilisation of Sloping Field in China. In *Proceedings of the International Symposium and Second Chinese National Conference on Rainwater Utilisation*. September 8-12, 1998 Xuzhou, Jiangsu Province, China. pp 110-117.