

# **Impact hydrologique des banquettes sur les apports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie**

**Slah NASRI**

INRGREF, B.P. 10 Ariana 2080, Tunisie, courriel : [nasri.slah@iresa.agrinet.tn](mailto:nasri.slah@iresa.agrinet.tn)

Tel. (216) 98 57 66 29, Fax (216) 71 71 79 51

## **RESUME**

A côté des grands ouvrages de retenue d'eau, la Tunisie a mis en place une multitude d'ouvrages plus modestes (lacs collinaires, banquettes, tabias, ...) pour retenir efficacement l'eau pluviale, si précieuse. Il faut profiter de l'eau lorsqu'elle arrive, surtout si elle est rare. C'est ce que la Tunisie a décidé de faire. Notre pays compte déjà plus d'une vingtaine de grands barrages et environ deux cents barrages de taille inférieure. Depuis 1990, le gouvernement a lancé une politique de mobilisation des eaux de surface par la mise en place d'un millier de lacs collinaires, de deux mille ouvrages d'épandage et de recharge des eaux de crues. Il a aménagé jusqu'à nos jours un million d'hectares avec des banquettes, tabias et autres ouvrages pour la collecte des eaux pluviales. C'est grâce à cette multitude d'ouvrages modestes que notre pays compte atteindre les trois objectifs principaux fixés: la mobilisation d'une grande partie des 500 millions de m<sup>3</sup> d'eau de ruissellement qui sont perdus actuellement vers la mer et les sebkhas, la réduction de l'envasement des grands barrages estimé actuellement à un taux de 25 millions de m<sup>3</sup> de sédiments par an et la protection des infrastructures à l'aval. Les lacs collinaires ont trois fonctions: la recharge des nappes, la protection des habitations et routes à l'aval et l'irrigation et les usages domestiques. Un travail de simulation numérique a été fait en prenant en compte les caractéristiques des petits bassins versants, les régimes des précipitations et la répartition de la pluie, dans le but de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de ces ouvrages. Les banquettes sont des talus à rétention totale ou partielle qui retardent les écoulements et améliorent l'infiltration sur les versants. Ce sont des levées de terre d'environ 100m de long aux extrémités ouvertes qui retiennent plus de 200m<sup>3</sup> d'eau chacune. Un bassin versant doté de plusieurs banquettes voit son coefficient de ruissellement considérablement réduit. Ce système permet d'écarter les crues en évitant des apports d'eau massifs et inutiles dans des retenues collinaires. Il permet également de réduire considérablement l'envasement des petites retenues.

**Mots-clés : Tunisie, Lacs collinaires, Banquettes mécaniques , Impact hydrologique , Erosion**

## **INTRODUCTION**

L'agriculture pluviale et la collecte des eaux de ruissellement sont des pratiques connues depuis plusieurs siècles en milieux arides et semi-arides. Une large gamme de techniques ont été développées et garantissent une production agricole dans différentes régions du moyen Orient et Maghrébines. De nos jours, la réhabilitation des systèmes traditionnels de conservation des eaux et du sol apparaît comme une opportunité considérable pour l'approvisionnement en eau et l'amélioration des bilans hydriques dans les régions où les ressources en eaux sont rares.

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 leur utilisation agricole (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 Taïmeh 1994). Cependant, très peu d'études se sont intéressées à la quantification des impacts hydrologiques des aménagements de conservation des eaux et du sol. Cet article présente les résultats des effets hydrologiques de deux types d'aménagement de conservation des eaux et du sol: les banquettes mécaniques et les lacs collinaires.

Les banquettes mécaniques constituent un aménagement de versant qui consiste à des levées de terres édifiées perpendiculairement à la pente du terrain permettant d'intercepter les eaux de ruissellement, d'améliorer l'infiltration et de réduire l'érosion des terres. Entre juillet 1996 et juillet 1997, 43% du bassin versant d'El Gouazine au centre de la Tunisie (18.1 km<sup>2</sup> de superficie totale) ont été aménagés en banquettes mécaniques. La construction de ces banquettes a significativement changé le comportement hydrologique de ce bassin versant. Avant l'introduction des banquettes mécaniques, les coefficients de ruissellement étaient de 20 à 35% des pluies les plus importantes. Après l'introduction de ces banquettes, les coefficients de ruissellement mesurés n'ont pas dépassé 10% même pour des pluies importantes (80mm en septembre 1998). De même, les apports annuels d'eau par ruissellement au lac collinaire d'El Gouazine, situé à l'exutoire du bassin versant, ont diminué de 50 à 80%. L'envasement du lac a été réduit à zéro après l'introduction des banquettes. De plus, les débits de pointes des crues ont été réduits de 60 à 90%.

Actuellement, les banquettes représentent l'aménagement des terres en pentes le plus répandu en Tunisie centrale. Jusqu'à présent (2001), environ 900.000 ha de terres agricoles et pastorales sont aménagées par des banquettes. Habituellement, ces banquettes mécaniques sont dimensionnées pour des pluies de retour de 10 ans afin de réduire l'érosion et d'intercepter les eaux de ruissellement sur les terres aménagées. Cependant, le fonctionnement hydraulique d'un tel aménagement n'est pas encore bien connu.

Dans la dorsale semi-aride tunisienne, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 674 lacs collinaires ont été achevés à la fin de l'année 2001. Un lac collinaire est une retenue créée par un petit barrage en terre qui contient quelques dizaines de milliers à 1 million de m<sup>3</sup> d'eau recueillie sur des bassins versants d'une superficie de quelques hectares à quelques km<sup>2</sup>. Ces ouvrages s'intègrent de façon naturelle dans le paysage en ne créant pas de nuisance particulière. Ils sont aptes à réguler les flux hydriques et donc susceptibles de maintenir les populations en place en leur assurant de réelles possibilités de développement. Leur construction vise les objectifs suivants: la protection contre les crues des infrastructures en aval, la mise à disposition d'une ressource en eau de manière disséminée dans le paysage, le captage du ruissellement pour la recharge des nappes phréatiques, l'amélioration de l'environnement par la création d'oasis par le reboisement et le développement local d'activités agricoles.

Ces petits barrages en terre, avec des déversoirs simples de type déversoir fusible, sont très sensibles aux crues violentes. Plus que le volume de la crue, c'est sa forme et la valeur du pic de crue qu'il faut chercher à prédéterminer pour dimensionner les déversoirs de crues. Pour un volume d'eau écoulé, la forme de l'hydrogramme dépend de la forme du bassin versant, des chemins de l'eau, de leur hiérarchisation et enfin des pentes: en un mot de la géomorphologie du bassin versant. Généralement, peu d'observations hydrologiques existent pour les petits bassins versants dans les régions arides et semi-arides, surtout concernant les crues exceptionnelles. Il est donc difficile de dimensionner les déversoirs des ouvrages hydrauliques comme les lacs collinaires.

Par ailleurs, dans ces régions, les bassins versants sont très sensibles à l'érosion et les réservoirs sont rapidement envasés. Par conséquent, la prédiction de volumes des crues pour

des événements importants devient cruciale. Pour cela, un modèle géomorphologique a été utilisé pour la simulation de la forme et du volume des hydrogrammes des crues exceptionnelles. Ce modèle est basé sur les caractéristiques du système de drainage superficiel qui peut être facilement extrait des cartes topographiques. Le modèle est appliqué à deux bassins versants expérimentaux représentatifs en Tunisie centrale. Nous utilisons le même modèle pour simuler les hydrogrammes de crues des pluies de périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans. Finalement, des conclusions pratiques sont discutées.

## 1. METHODOLOGIE : modélisation Pluies-Débits

Les méthodologies utilisées sont développées de manière détaillée dans ma thèse (Nasri; 2002). L'équation du bilan hydrologique a été utilisée pour la reconstitution des crues arrivant dans un lac collinaire. Une fonction de production pluie brute - pluie nette a été développée à partir d'observations hydrologiques pluies - débits. Cette fonction de production a été associée à la fonction de transfert du modèle géomorphologique H2U (Hydrogramme Universel Unitaire) développée par Cudennec & Duchesne (1997). Les observations hydrologiques couvrent la période du 1993 jusqu'à 1997 pour le lac de Dekekira et de 1993 jusqu'à 2000 pour le lac El Gouazine. Ces bilans hydrologiques ont été calculés avec un pas de temps de 5 minutes.

Les petits barrages sont très sensibles aux crues violentes et à l'envasement rapide. Par exemple, le lac collinaire de Sadine (volume de stockage 34380m<sup>3</sup>) dans la région de Makthar au centre de la Tunisie, a été totalement comblé de sédiments suite à une seule crue torrentielle celle du 04 septembre 1995 (DCES/IRD, 1996). Une hauteur de pluie totale de 49mm, avec une intensité maximale de 198 mm/h pendant 10 mn, avait un coefficient de ruissellement d'environ 50% et un volume ruisselé trois fois supérieure à la capacité de stockage de la retenue. Par conséquent, plus que le volume de la crue, c'est sa forme et la valeur de son maximum qu'il faut chercher à prédéterminer pour dimensionner ces ouvrages et leurs déversoirs de crues. Ceci est très important dans les régions arides et semi-arides.

Pour évaluer les effets d'une crue exceptionnelle sur un petit barrage en terre situé en zone semi-aride tunisienne, une étude de simulation de crues de différentes périodes de retour (récurrence de 5, 10, 20 et 50 ans) a été menée sur deux lacs: El Gouazine et Dekekira. Sur ces deux lacs, où des observations de niveau de l'eau et de pluviométrie ont été réalisées depuis 1993, nous avons reconstitué les crues entrant dans le lac. La chronique pluie - débit ainsi obtenue a servi au calage d'un modèle simple basé sur la décomposition de la pluie brute en pluie d'imbibition, pluie interceptée, pluie infiltrée et pluie nette pour ce qui concerne la fonction de production et du modèle H2U basé sur les chemins hydrauliques en ce qui concerne la fonction de transfert. Par ailleurs, une étude statistique des pluies journalières a été réalisée. Elle a permis de simuler les hydrogrammes des pluies exceptionnelles.

L'Hydrogramme Unitaire Universel  $u(t)$  est d'après Cudennec et Duchesne (1997):

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

$n$  : est l'ordre de Strahler (1952) du bassin versant,  $\bar{t}$  (en s): temps de parcours moyen dans le réseau hydrographique correspondant au  $\bar{L}$  (en m), le chemin hydraulique moyen et  $\Gamma$  : symbolise la fonction gamma.

Ce modèle a été couplé à une fonction de production élaborée par Nasri et *al.* (2001) qui définit la pluie nette (lame ruisselée) à partir de la hauteur précipitée sur le bassin versant sur chaque intervalle de temps (5 mn) en considérant :

$$i_{tot} = i_{ini} + i_{int} . t_i + i_{eff} = i_{int} + i_{int} . t_i + i_{net} + i_{inf} \quad [2]$$

1. la pluie d'imbibition ( $i_{ini}$  en mm) qui correspond à la quantité de pluie nécessaire à l'apparition de l'écoulement,
2. la pluie interceptée ( $i_{int}$  en mm.h<sup>-1</sup>) qui correspond à un seuil d'intensité de pluie limite du ruissellement, supposé constant au cours de l'averse,
3. la pluie efficace ( $i_{eff}$  en mm), différence entre la pluie brute et la somme de la pluie d'imbibition et de la pluie interceptée. La pluie efficace est la somme de la pluie nette ( $i_{net}$ ) et de la pluie infiltrée ( $i_{inf}$ ).
4. le coefficient de ruissellement efficace ( $K_{eff}$ ), rapport de la pluie nette ( $i_{net}$ ) et de la pluie efficace ( $i_{eff}$ ).

Les trois paramètres  $i_{ini}$ ,  $i_{int}$ , et  $K_{eff}$  permettent de calibrer la fonction de production. La pluie d'imbibition ( $i_{ini}$  en mm) est calculée par itération pour que l'hydrogramme calculé commence de manière simultanée avec l'hydrogramme observé. Le seuil d'intensité de pluie ( $i_{int}$  en mm.h<sup>-1</sup>) et le coefficient de ruissellement efficace ( $K_{eff}$  en %) sont optimisés sur les volumes de crue observés.

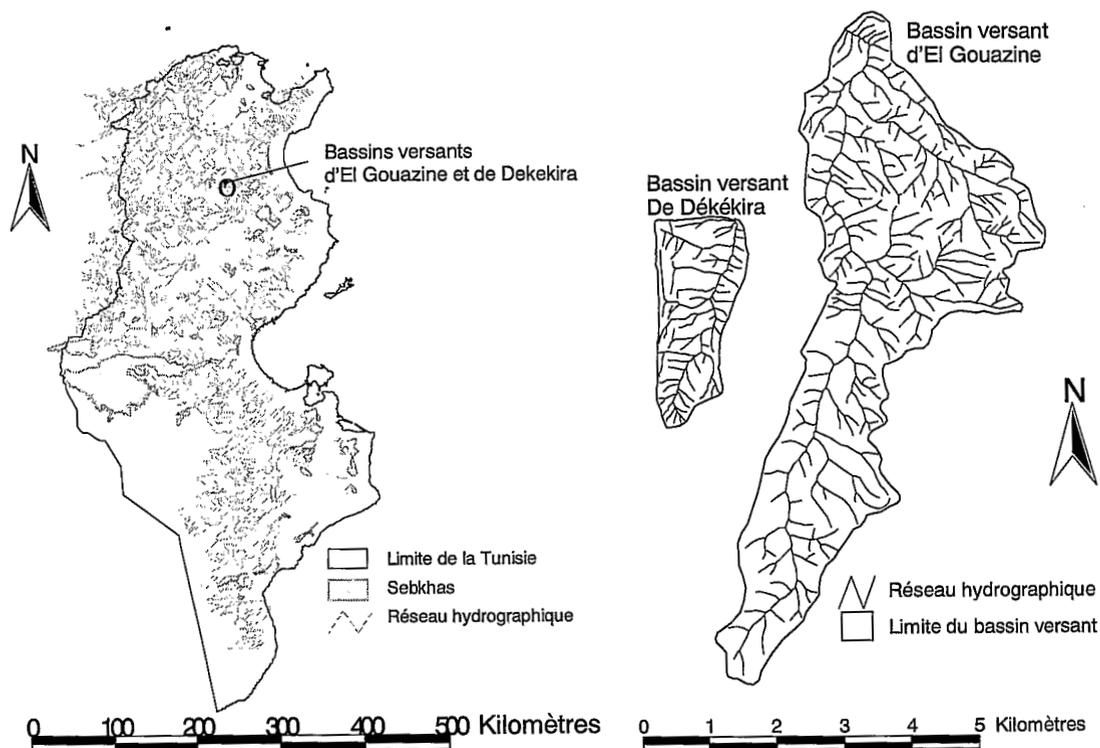
## 2. EXPERIMENTATION

L'étude de l'impact hydrologique des techniques de conservation des eaux et du sol a été faite dans deux régions de la Tunisie et a concerné deux types d'aménagement à savoir les banquettes mécaniques et les lacs collinaires. La figure 1 nous montre la localisation des sites expérimentaux. Les bassins versants d'El Gouazine et de Dekekira situés sur les piémonts de Jebel Serj au centre de la Tunisie, environ à 10 km de la ville d'Ousseltia, ont été les sites expérimentaux pour le développement et le calibrage d'un modèle hydrologique. Entre juillet 1996 et juillet 1997, le bassin versant d'El Gouazine a été aménagé en banquettes mécaniques sur une superficie d'environ 43% de sa superficie totale (18,1 km<sup>2</sup>). L'introduction de ces aménagements a changé significativement les conditions hydrologiques de fonctionnement du bassin versant. Une comparaison du comportement hydrologique du bassin versant a été faite avant et après aménagement.

### Les bassins versants d'El Gouazine et Dekekira

Deux bassins versants expérimentaux, El Gouazine (18,1 km<sup>2</sup>) et Dekekira (3,16 km<sup>2</sup>), (Fig.2), ont été choisis pour le calage et la validation de modèles hydrologiques pluies-débits. A l'exutoire de chaque bassin versant, un lac collinaire a été construit. La précipitation moyenne annuelle est de 395 mm au poste climatique d'Ousseltia pendant une longue période d'observation 1962-1989. La température moyenne annuelle de l'air est de 19,1°C, avec un minimum de 10,4°C en janvier et un maximum de 28,6°C en août. L'évapotranspiration potentielle (Riou, 1980) y dépasse la précipitation. Elle était approximativement de 1680mm à Kairouan pour la période de 1964 à 1982 et de 1460mm à Ousseltia pour la période de 1993 à 1995. La saison pluvieuse s'étend de septembre à mai. La saison chaude et sèche s'étend de juin à août. La chute de pluie est souvent violente avec des courtes durées. L'intensité horaire maximale de la pluie y dépasse souvent 50mm/h et l'intensité de pluie en 30 minutes dépasse 100mm/h. Le ruissellement y est par conséquent très irrégulier et les crues sont soudaines et violentes. Pendant les crues, les cours d'eau charrient de grands volumes de limons érodés sur

les versants et les rives de l'oued. Cela mène à des variations des chemins des cours d'eau. Les bassins versants ont leurs vallées dans les alluvions du Pleistocène. Les affleurements calcaires de l'Eocène forment les crêtes des deux bassins versants. Les sols sont peu profonds avec encroûtement calcaire en surface. Les horizons de surface du sol sont des lithosols, calcimagnésiques avec une abondance de pierres. Dans la partie aval du bassin versant, des alluvions argileuses profondes et des sols limoneux alternent avec les sols calcimagnésiques. Les sols à Dekekira sont peu évolués, régosoliques sur roches mères calcaires et argiles gypseuses.



**Figure 1.** Localisation des sites expérimentaux sur la carte de la Tunisie.

**Figure 2.** Bassins versants expérimentaux d'El Gouazine et de Dekekira

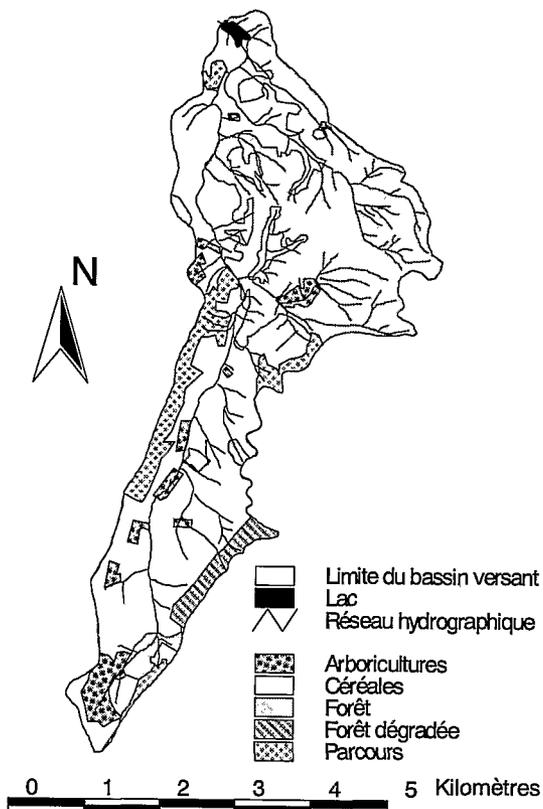


Figure 3. Carte d'occupation des sols du bassin versant d'El Gouazine.

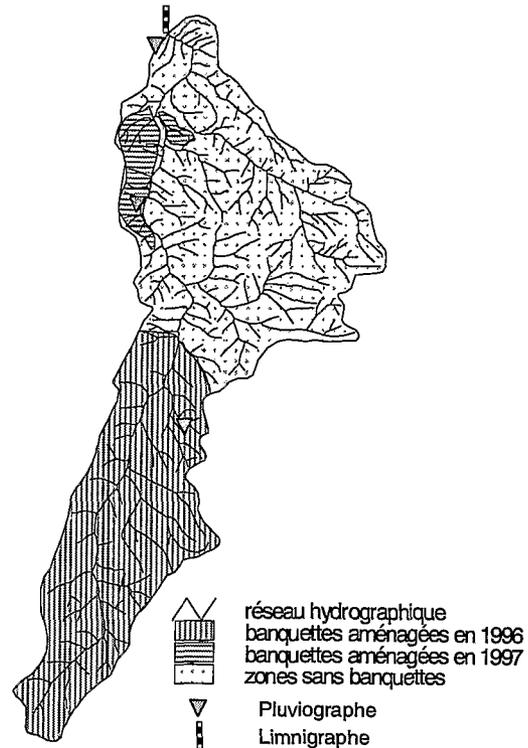


Figure 4. Localisation des aménagements en banquettes réalisés de juin 1996 à juillet.

La carte d'occupation des sols (Fig.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) et 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 (Fig.4 et 5, Photo1): 707 hectares du 17 juin au 07 décembre 1996 et 76 hectares du 06 juin au 29 juillet 1997.



Photo1. Un élément de banquette rempli d'eau (NASRI S., septembre 1998)

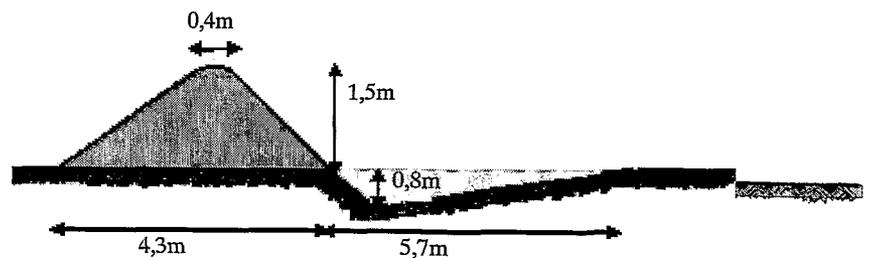


Figure 5. Schéma d'une coupe transversale de banquette

Ces banquettes sont constituées de levées en terre d'une hauteur moyenne de 1,5m. L'écartement entre deux banquettes successives, fonction de la pente, est en moyenne de 25m. 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 100m et une section transversale moyenne de 2,28m<sup>2</sup> en amont de la banquette, soit une capacité de rétention maximale égale à 228m<sup>3</sup>. L'aménagement réalisé de juin 1996 à juillet 1997 sur le bassin versant d'El Gouazine ayant une longueur totale de 117540 mètres linéaires, il correspond à une capacité maximale de stockage d'environ 257640m<sup>3</sup> d'eau de ruissellement, soit un peu plus que la capacité de rétention maximale de la retenue du lac El Gouazine.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous présentons les principaux résultats obtenus concernant les impacts hydrologiques de deux techniques de conservation des eaux et du sol. Ces résultats sont organisés en deux parties: (i) impacts des banquettes à rétention totale sur le ruissellement et sur l'érosion, (ii) modélisation pluies – débits de petits bassins versants à l'amont des lacs collinaires.

#### 1- Impacts hydrologiques des banquettes sur les apports liquides et solides

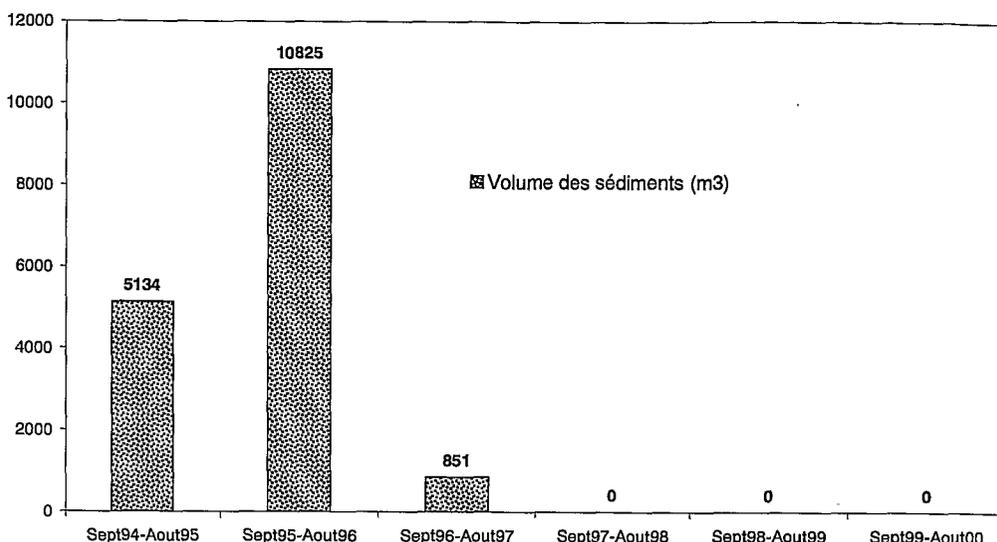
Les banquettes construites de juin 1996 à juillet 1997 dans la partie cultivée du bassin versant d'El Gouazine ont joué un rôle majeur sur les écoulements superficiels qui ont alimenté le lac collinaire servant d'exutoire à ce bassin versant. Dès le mois de juillet 1997, les fortes pluies provoquent 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 importante.

Le tableau 1 présente les résultats du calcul des bilans d'eau de la retenue collinaire 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 1:** Bilan des apports d'eau par ruissellement avant et après aménagement en banquettes du bassin versant.

Année	Avant aménagement		Après aménagement			
	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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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

Comme la montre la figure 6, l'introduction des banquettes dans le bassin versant d'El Gouazine a eu un effet important sur la sédimentation de la retenue. Si nous assimilons le volume de sédimentation recueilli dans le lac, et mesuré à la fin de chaque année hydrologique, comme étant égal à l'érosion globale du bassin versant, nous remarquons qu'après aménagement du bassin versant en banquettes, l'érosion globale est nulle.



**Figure 6.** Volumes annuels des sédiments observés avant et après aménagement du bassin versant en banquettes.

Les crues observées à l'exutoire du bassin versant d'El Gouazine avant le mois de juillet 1996 sont consignées sur le tableau 2. 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.

**Tableau 2:** Crues enregistrées avant aménagement du bassin versant d'El Gouazine en banquettes.

Date de la crue	Pluie totale (mm)	Intensité max. en 30mn (mm.h <sup>-1</sup> )	Volume ruisselé (m <sup>3</sup> )	Débit maximal (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	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

Depuis l'aménagement du bassin versant en banquettes mécaniques, les apports d'eau au barrage d'El Gouazine sont très faibles. A 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). Les crues observées après le mois de juillet 1996 sont consignées sur le tableau 3.

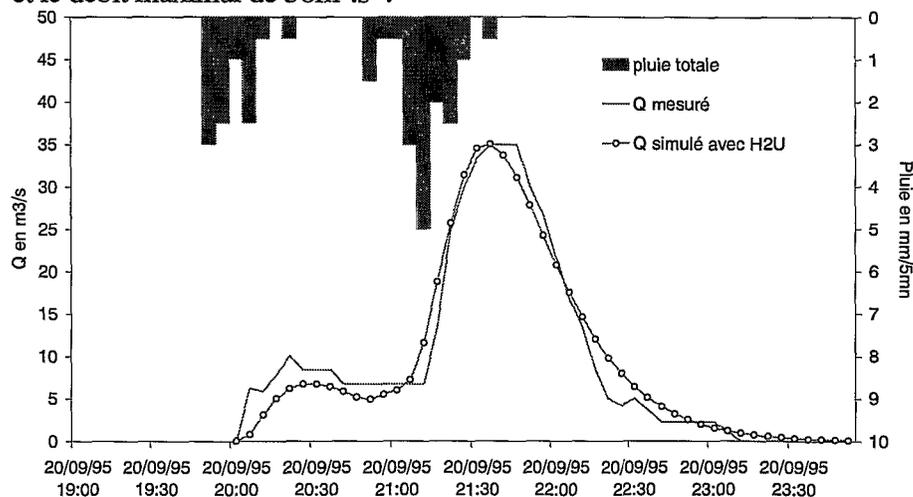
**Tableau 3:** Crues enregistrées après aménagement du bassin versant d'El Gouazine en banquettes.

Date	Pluie totale (mm)	Intensité max. en 30 mn (mm.h <sup>-1</sup> )	Volume ruisselé (m <sup>3</sup> )	Débit maximal (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Coefficient de ruissellement (%)	Temps de réponse (mn)
09/09/1996	50	29,0	16 500	5,3	1,8	105
18/08/1997	32	36,8	2 400	2,8	0,4	105
05/09/1997	44	36,0	7 000	0,2	0,9	90
06/09/1997	22	11,8	5 600	0,9	1,4	155
14/09/1997	25	44,0	20 600	1,0	4,6	180
02/10/1997	24	40,2	23 500	4,3	5,4	65
24/09/1998	80	54,0	128000	5,3	8,8	85
15/01/1999	43	11,0	2 500	25,3	0,3	85
17/01/1999	20	9,8	2 300	0,1	0,6	240
19/01/1999	60	9,6	6 000	0,4	0,6	145
27/11/1999	62	10,8	6 700	1,4	0,6	105
30/11/1999	19	6,0	1 200	0,2	0,3	240

En comparant les crues du bassin versant d'El Gouazine avant et après aménagement (Fig.11 et 12), nous pouvons conclure que les zones cultivées du bassin versant jouent un rôle majeur dans la genèse du ruissellement et que l'aménagement de ces zones cultivées a privé le barrage d'El Gouazine de la presque totalité de ses apports superficiels.

Sur la figure 7, on constate que la pluie du 20 septembre 1995 (27mm; 28mm/h) a provoqué très rapidement un ruissellement après un temps de réponse de 35mn. Le débit maximal de la crue, très élevé, est égal à 35m<sup>3</sup>/s. Le volume d'eau apporté par cette crue fut très important, égal à 278580m<sup>3</sup>. Cet apport a suffi à remplir le lac et provoqua un déversement.

Sur la figure 8, on constate que la pluie du 05 au 06 septembre 1997 (44mm ; 36mm/h) a provoqué un ruissellement différé avec un débit maximal de 1,64m<sup>3</sup>/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 940m<sup>3</sup>. 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 8 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 276000m<sup>3</sup> et le débit maximal de 38m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.



**Figure 7.** Hydrogrammes observé et reconstitué avec le modèle H2U de la crue du 20-09-1995 à El Gouazine.

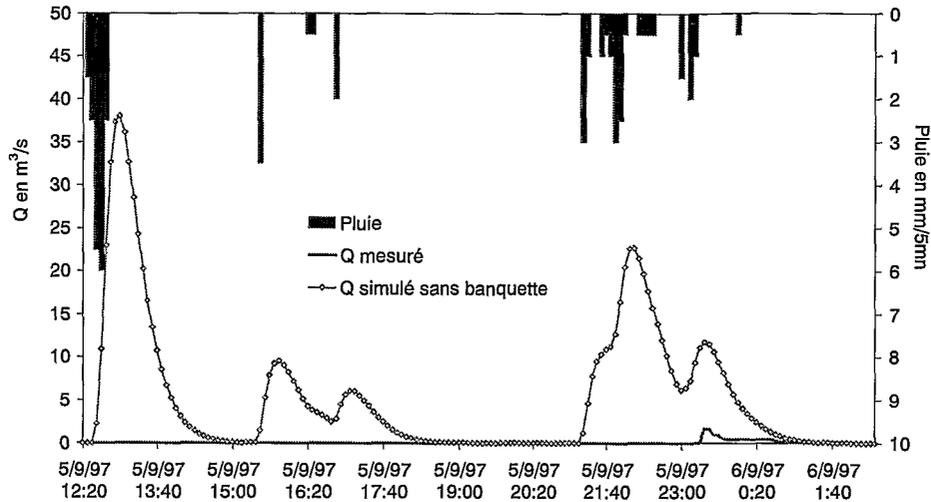


Figure 8. Crues du 5 au 6 septembre 1997 reconstituées sur le bassin versant d'El Gouazine avec le modèle H2U.

## 2- Modélisation Pluies - Débits à l'amont des lacs collinaires

### Fonction de production:

La figure 9 nous montre la déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékékira en pluie d'imbibition, pluie interceptée, pluie infiltrée et pluie nette.

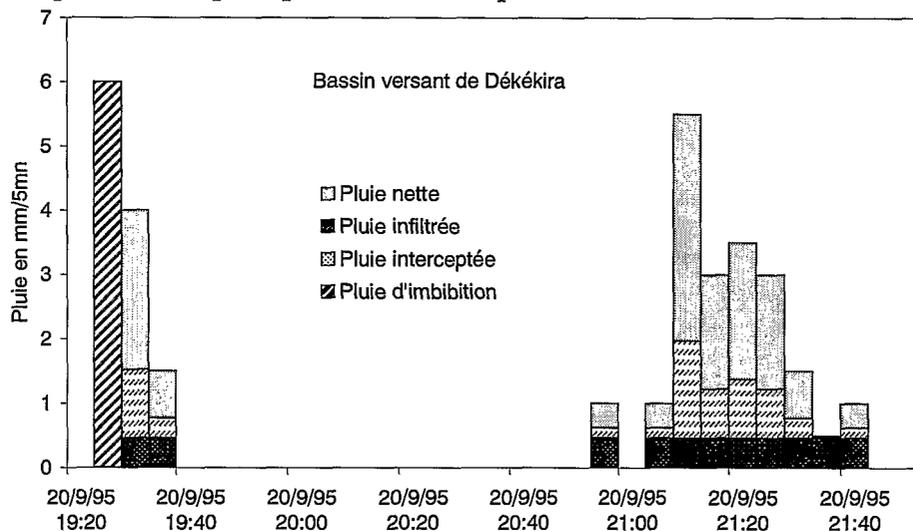


Figure 9. Déconvolution de la pluie du 20/09/1995 à Dékékira

Le tableau 4 nous donne les résultats statistiques de la déconvolution de la pluie brute pour les deux bassins versants d'El Gouazine et de Dékékira.

Tableau 4: Paramètres de calage de la fonction de production

Bassin versant de Dékekira : 24 événements				
	Pluie d'imbibition (mm)	Pluie interceptée		Coefficient de ruissellement efficace (%)
		Seuil (mm/h)	Hauteur (mm)	
Moyenne	7,10	3,92	3,85	43,17
Médiane	7,50	3,78	2,42	47,00
Ecart type	4,00	2,98	4,71	17,84
Bassin versant de El Gouazine : 14 événements				
Moyenne	7,22	3,56	2,67	26,94
Médiane	8,00	3,96	1,85	19,50
Ecart type	4,16	1,81	1,97	19,69

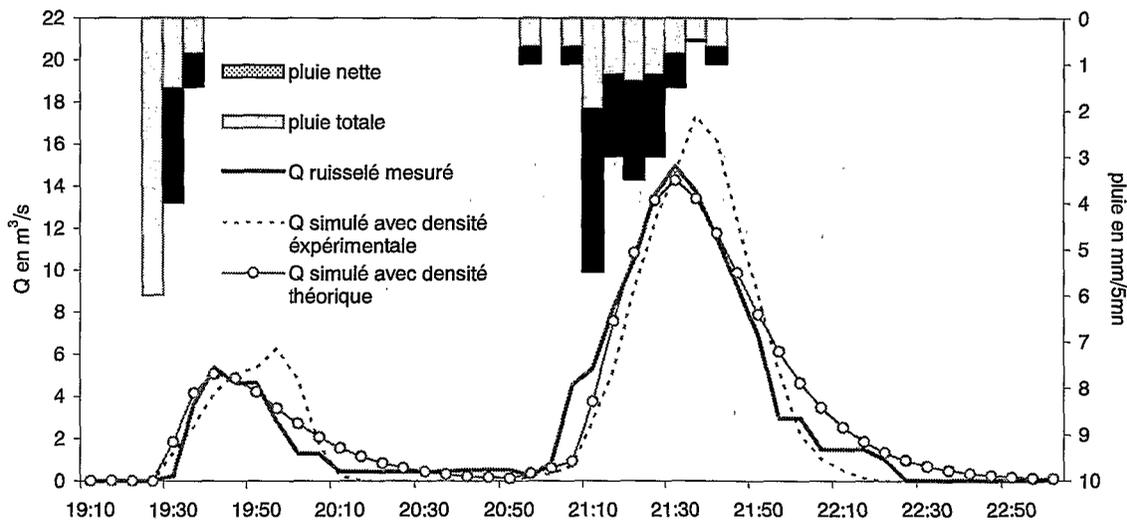
### Fonction de transfert:

L'équation [1] de la fonction de transfert montre qu'il n'y a qu'un seul paramètre  $\bar{t}$ , qui est le temps de parcours de l'eau dans la longueur moyenne du bassin versant pour arriver à l'exutoire (caractéristique géomorphologique du bassin). Pratiquement, ce paramètre est calculé par itération en prenant comme valeur de départ le temps de réponse du bassin (temps séparant le pic d'intensité de l'hyétogramme à la pointe de la crue) et en prenant comme critère d'optimisation le minimum de différence sur le calcul des débits de pointe. Le tableau 5 donne les valeurs statistiques pour le paramètre: ( $\bar{t}$ ).

**Tableau 5:** valeurs statistiques pour le paramètre  $\bar{t}$  (minutes)

	Bassin versant de Dékekira 24 événements, $\bar{L} = 1848\text{m}$ et $n = 4$	Bassin versant d'El Gouazine 14 événements, $\bar{L} = 5551\text{m}$ et $n = 5$
Moyenne	21	33
Médiane	17	33
Ecart type	11	18

La figure 10 nous montre le résultat de la modélisation à Dékekira pour l'événement du 20/9/95 en utilisant la fonction de densité des longueurs de réseaux expérimentaux ou modélisé par une loi  $\Gamma$ .



**Figure 10.** Hydrogrammes observé et reconstitués avec le modèle H2U en utilisant la fonction de densité des longueurs de réseaux expérimentaux ou modélisé par une loi  $\Gamma$  de la crue du 20-09-1995 à Dékekira

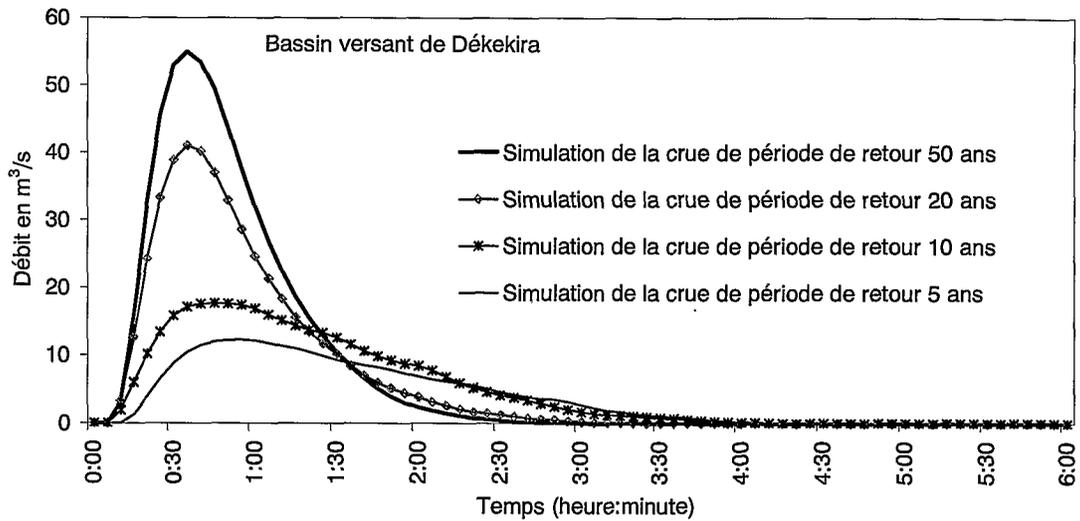
### Simulation des crues exceptionnelles

On a construit des hyétogrammes type pour des averses de récurrence donnée en faisant l'hypothèse que l'averse correspondante a la hauteur de la pluie journalière et le pic d'intensité maximale en cinq minutes de même récurrence. On lui donne la forme des averses de type orageux lors d'un déplacement frontal d'une dépression. Le hyétogramme comprend une ondée préliminaire de faible intensité et de courte durée. Cette ondée est suivie par le pic d'intensité maximale puis par une longue traîne avec des intensités décroissantes (tableau 6).

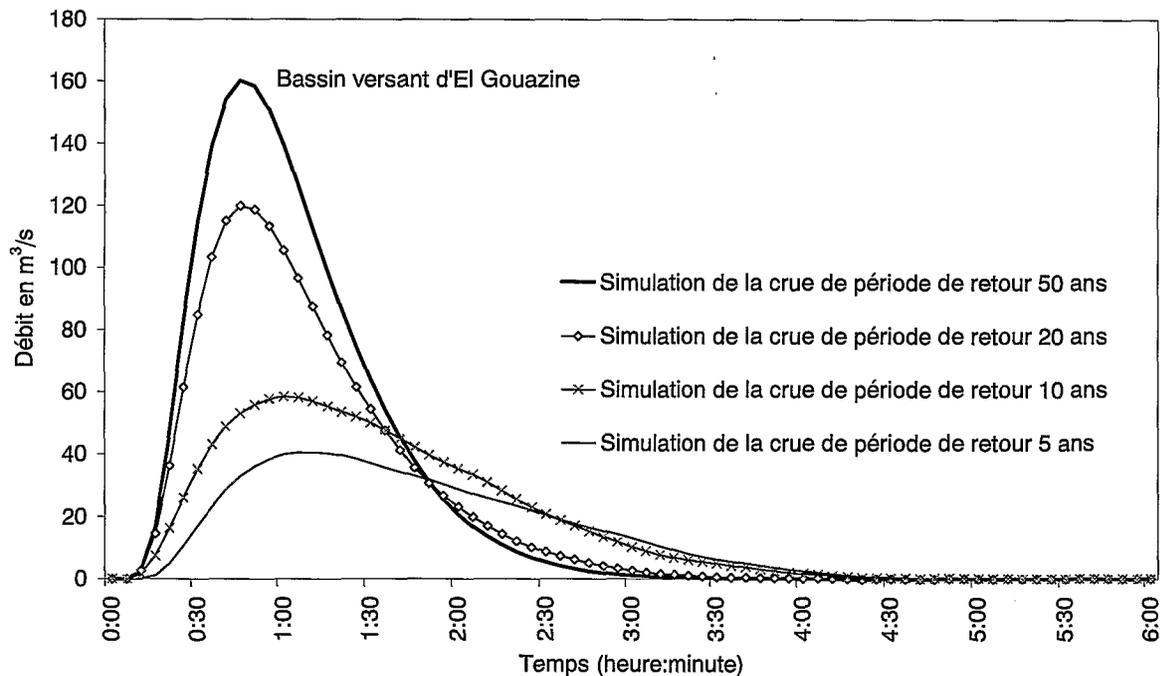
**Tableau 6: Pluie cumulée (en mm) pour des périodes de retour de 5, 10, 20 et 50 ans.**

Durée en mn	5	10	15	30	45	60	90	120	180	240
Récurrance										
5 ans	2	6	9	20	30	38	52	62	75	78
10 ans	3	8	15	30	42	53	70	82	91	94
20 ans	9	25	61	79	89	101	107	110		
50 ans	8	33	81	105	116	127	131	131		

On réalise la simulation des crues en prenant les valeurs moyennes des paramètres de calage (trois pour la production et un pour le transfert). Les figures 11 et 12 montrent les simulations pour les crues d'occurrence 2; 5; 10; 20 et 50. Le tableau 7 récapitule les valeurs caractérisant les crues exceptionnelles.



**Figure 11. Prédétermination des crues exceptionnelles à Dékikéra**



**Figure 12. Prédétermination des crues exceptionnelles à El Gouazine**

**Tableau 10:** Caractéristiques des crues exceptionnelles sur les bassins étudiés

Bassin versant Dékekira						
	Volume (m <sup>3</sup> )	Débit de pointe (m <sup>3</sup> /s)	Qmax déversé (m <sup>3</sup> /s)	Qmax déversoir (m <sup>3</sup> /s)	Temps de montée (mn)	Temps de base (mn)
Crue rec 0,2	81 250	12	0	90	50	205
Crue rec 0,1	106 580	18	0	90	40	170
Crue rec 0,05	137 500	41	0	90	30	110
Crue rec. 0,02	169 299	55	0	90	30	100
Bassin versant El Gouazine						
Crue rec 0,2	295 234	41	20	90	55	220
Crue rec 0,1	385 251	59	45	90	50	190
Crue rec 0,05	493 698	120	106	90	40	155
Crue rec. 0,02	606 175	160	158	90	35	125

En considérant que les paramètres de calage obtenus crue par crue ont une distribution normale, il est possible de calculer un intervalle de confiance pour l'estimation des paramètres de la crue exceptionnelle estimée. Le tableau 8 donne les intervalles de confiance à 90% pour l'estimation des caractéristiques des crues décennales pour les deux bassins étudiés.

**Tableau 8:** Intervalles de confiance (90%) de l'estimation de la crue décennale

Bassin versant	Qmax (m <sup>3</sup> /s)	Volume (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Temps de montée (min)	Temps de base (min)
Dékekira	[14,1 ; 23]	[87,3 ; 123,6]	[55 ; 30]	[240 ; 200]
El Gouazine	[32,5 ; 51]	[97,3 ; 191,2]	[85 ; 35]	[330 ; 240]

#### 4. CONCLUSIONS

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.

En ce qui concerne l'envasement de la retenue collinaire d'El Gouazine, nous avons remarqué que, pendant les trois années après aménagement du bassin versant, le volume de sédimentation recueilli dans le lac a été nul. On peut déduire de ces mesures que l'érosion globale du bassin versant est nulle. Cependant si ces banquettes ont pour rôle de réduire les longueurs de pentes sur les versants et de briser l'énergie abrasive des eaux de ruissellement, l'érosion des espaces inter-banquettes n'est pas tout à fait nulle, on continue à recueillir des sédiments dans les canaux à l'amont des talus. Des mesures de nivellement précis et périodique après chaque pluie sont entrain de se faire dans deux sites aménagés en banquettes dans le même bassin versant peuvent nous renseigner sur l'érodibilité de ces espaces inter-banquettes et sur les quantités de sédiments accumulées dans les canaux au lieu d'aller se déposer dans le lac à l'aval.

Si nous assimilons le volume de sédimentation recueilli dans le lac, et mesuré à la fin de chaque année hydrologique, comme étant égal à l'érosion globale du bassin versant, nous remarquons qu'après aménagement du bassin versant en banquettes, l'érosion globale est nulle.

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 la recharge de la nappe phréatique, 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 diminuent les débits maximum et les transports solides.

Le modèle H2U a permis de prédéterminer des crues exceptionnelles pouvant survenir dans un petit bassin versant de lac collinaire. La prédétermination des crues se fait après l'analyse statistique d'événements pluvieux et la connaissance de la morphologie du bassin versant. La fonction de production par déconvolution du hyétogramme de la pluie brute peut paraître simpliste. Elle est adaptée à un calage crue par crue du modèle dans un objectif de simulation avec des valeurs moyennes. L'hypothèse de base de cette application, courante en hydrologie opérationnelle, est que la crue d'une occurrence donnée est produite par l'averse de même occurrence toutes les autres conditions de ruissellement étant moyennes. La fonction de transfert, plus élaborée, repose sur le temps de parcours des chemins hydrauliques. Elle permet une bonne simulation de la forme de la crue et de sa pointe; paramètres de première importance pour le dimensionnement des évacuateurs de crues pour des petits barrages en terre compactée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**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. 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 / INRGREF Tunis, 120p + 6 annexes.

**Cudennec C., 2000.** Description mathématique de l'organisation du réseau hydrographique et modélisation hydrologique. Thèse, ENSAR, Rennes, 198p + 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, 35p.

**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, Tunis, Tunisia.
- Ennabli N., 1993.** Les aménagements hydrauliques en Tunisie. Institut National Agronomique de Tunisie.
- Evenari M, Shanan L, Tadmor NH. 1971.** The Negev: the challenge of a Desert. Boston Harvard University Press, pp 221-228.
- Mansouri T., 2001.** Apport de la modélisation hydrologique spatialisée à la connaissance des écoulements et des transports solides. Université de Tunis II (Bourse IRD).
- 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.
- Nasri S., 2002.** Hydrological Effects of Water harvesting Techniques. A study of Tabias, Soil Contour ridges, and Hill Reservoirs in Tunisia. Thesis, Department of Water Resources Engineering. Lund Institute of Technology, Lund University, Sweden. Report N° 1030.
- 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" 04-08 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.
- Riou C., 1980.** Une formule empirique simple pour estimer l'évapotranspiration potentielle moyenne en Tunisie. Cah. ORSTOM, série Hydrol. 17 2, 129-137.
- Shanan L, Tadmor NH, Evenari M, Reiniger P. 1970.** Runoff farming in the desert. III Micro-catchments for improvement of desert range. Agronomy Journal 62: 445-448.
- Strahler AN. 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.

**RESEAU  
EROSION**



**Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION**

**Pour citer cet article / How to cite this article**

Nasri, S. - Impact hydrologique des banquettes sur les apports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie, pp. 115-129, Bulletin du RESEAU EROSION n° 21, 2002.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : [beep@ird.fr](mailto:beep@ird.fr)