

## LES LACS COLLINAIRES EN TUNISIE : ENJEUX, CONTRAINTES ET PERSPECTIVES

### HILL RESERVOIRS IN TUNISIA : STAKES, CONSTRAINTS AND PROSPECTS

par Jean **Albergel** (\*) et Nejib **Rejeb** (\*\*)

(note présentée par Jean **Albergel**)

#### RÉSUMÉ

Au début de la décennie 1990, la Tunisie s'est lancée dans un ambitieux programme de construction de 1000 lacs collinaires dans la zone semi-aride, d'ici l'an 2000. Ces lacs sont la pièce maîtresse de la Stratégie nationale en matière de conservation des eaux et des sols, dont les objectifs sont de réduire les pertes en terres agricoles (estimées à 10 000 ha.an<sup>-1</sup>), de réduire l'envasement des barrages (25 Mm<sup>3</sup> actuellement), d'augmenter la recharge des nappes, de mobiliser la plus grande partie possible des 500 Mm<sup>3</sup> d'eau actuellement perdus dans la mer ou dans les sebkhas (sources : ministère de l'Agriculture, Direction de la Conservation des Eaux et des Sols). Déjà 450 lacs ont été construits et un réseau de 26 bassins versants représentatifs du milieu semi-aride a été équipé en 1993 pour suivre les bilans hydrologiques, la qualité de l'eau des retenues et les différents impacts des petits barrages, sur la ressource en eau, sur l'environnement et sur le niveau de vie des agriculteurs riverains. Les données qu'il fournit doivent servir à quantifier une ressource hydrique encore mal connue et à envisager sa gestion de façon rationnelle en fonction de sa variabilité, de sa qualité et des besoins de la population locale. A partir des travaux en cours sur l'étude des bilans en eau et des pertes de sol, cette communication montre comment ces nouvelles infrastructures répondent aux objectifs qui leur sont assignés et quelles sont les contraintes et les perspectives de leur développement.

**Mots clés** : réservoir d'eau, terre en pente, zone semi-aride, hydrologie, sédiment, recharge de la nappe, bassin versant, érosion hydrique, utilisation de l'eau, Tunisie.

#### SUMMARY

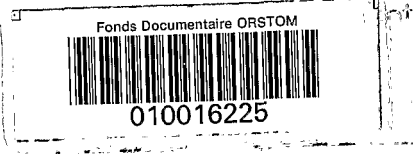
At the beginning of the nineties, the Tunisian Government proposed to build one thousand hill reservoirs by the year 2000. This ambitious program of the National Strategy concerning water and soil conservation aims to reduce losses in agricultural lands (estimated at 10 000 ha/year), to reduce the sedimentation in the dams (25Mm<sup>3</sup> currently), to increase the refilling of water tables, to mobilize the greatest possible part of the 500 Mm<sup>3</sup> currently lost in the sea or in sebkhas (sources : Ministry of Agriculture, Direction of Water and Soil Conservation). Up to now, approximately 450 of those reservoirs have been constructed. In central Tunisia, in the semi-arid dorsal region that extends from the Cap Bon to the Algerian border, 26 artificial lakes and their watersheds were chosen to make up a network of hydrological, agronomic, economic, social and environmental observations. These lakes have highly diverse intake areas ranging from slightly inhabited semi-forests to areas that are devoted entirely to agriculture. Their watershed areas vary from a few hectares to several dozen square kilometers. They are also representative of the rainfall gradient of the semi-arid region, which is 250 to 500 mm of rainfall annually. This experimental network is used to study the water balances, the evolution of water quality and the different impacts of these infrastructures on the water resources (surface and underground tables), on the environment and on the farmer's standard of living. The data that it provides have to quantify a

(\*) Directeur de Recherche, Mission ORSTOM de Tunis, BP 434, 1004 Tunis El-Menzah. (Programme U.E. INCO DC Hydromed).

(\*\*) Directeur général de l'INRGRF, BP 10, Ariana Tunisie (Programme U.E. INCO DC Hydromed).  
C.R. Acad. Agric. Fr., 1997, 83, n° 2, pp. 77-88. Séance du 19 mars 1997.

Fonds Documentaire ORSTOM  
B\*16225 ex 1

MH 81905



*badly understood water resource and to plan its rational management according to its variability, its quality and the needs of the local population. From ongoing work about water balances and soil losses, this paper shows how these new infrastructures respond to the objectives and what are the main constraints and prospects for their development.*

**Key words :** water reservoirs, stoping land, semiarid zones, hydrology, sediment, groundwater recharge, watersheds, water erosion, water use, Tunisia.

## 1. INTRODUCTION

La maîtrise de l'eau a, de tout temps, été un puissant facteur d'épanouissement des civilisations du Nord et du Sud de la Méditerranée. De la simple citerne enterrée, instrument vital de la survie familiale en zone aride, au grand barrage s'inscrivant dans une politique nationale de garantie d'approvisionnement au profit du plus grand nombre, le stockage de l'eau a toujours figuré au premier rang des préoccupations tunisiennes.

Avec l'avènement des stratégies décennales (1990-2000) en matière d'aménagement des terres en pente, de mobilisation des ressources en eau, et d'entretien et sauvegarde des aménagements, il est projeté de construire 1000 lacs aptes à stocker annuellement 50 millions de mètres cubes, principalement situés tout au long de la dorsale tellienne et plus généralement dans le nord et le centre du pays. Actuellement, 450 de ces lacs sont construits.

Un lac collinaire est une retenue créée par un petit barrage en terre. Les lacs collinaires contiennent quelques dizaines de milliers à 1 million de m<sup>3</sup> d'eau recueillis sur des bassins versants d'une superficie de quelques hectares à quelques km<sup>2</sup>. Ils s'intègrent de façon naturelle dans le paysage en ne créant pas de nuisance particulière. Ils sont aptes à réguler les flux hydriques susceptibles de maintenir les populations en place en leur assurant de réelles possibilités de développement (5). Leur construction vise les objectifs suivants :

- protection des infrastructures en aval : ville, barrage, périmètre agricole, contre les crues et contre l'érosion,
- mise à disposition d'une ressource en eau de manière disséminée dans le paysage, qui peut servir à l'alimentation humaine, à l'abreuvement du bétail, à la micro-irrigation, etc.,
- captage du ruissellement et recharge des nappes phréatiques,
- amélioration de l'environnement: création d'oasis, reboisement,
- création d'une dynamique de développement, fixation des populations.

## 2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODES

### 2.1. Installation expérimentale d'un lac collinaire et acquisition des données

En Tunisie centrale, dans la dorsale semi-aride, depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne, 26 retenues artificielles ont été sélectionnées pour constituer un réseau d'observations et de surveillance des lacs

collinaires et de leurs bassins versants. Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leur bassin versant varie de quelques centaines d'hectares à quelques dizaines de km<sup>2</sup>. Elles sont aussi représentatives du gradient pluviométrique annuel de la zone semi-aride de 250 mm à 500 mm.

Chaque lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données ; la première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0,5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crues est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. Les données caractérisant le bassin versant, la retenue et la station de mesures hydrologiques sont consignées dans une banque de données géoréférencées. Celle-ci est remise à jour après chaque modification de l'appareillage, nouvelle mesure de la bathymétrie ou changement constaté de l'occupation des terres.

La bathymétrie de chaque lac est effectuée au moins une fois par année hydrologique. Elle est rapportée au nivellement fin du site et permet d'apprécier le taux d'envasement de la retenue et d'établir les courbes "hauteur / volume et hauteur / surface".

Des échantillons de sols des bassins versants et de sédiments exonés des retenues sont prélevés, puis analysés. On réalise également des mesures physico-chimiques (O<sub>2</sub> dissous, température, pH, conductivité électrique) et des prélèvements d'eau pour l'analyse des ions majeurs et du phosphore par campagne trimestrielle. Ponctuellement, pour quelques lacs, la structure verticale de la colonne d'eau (transparence, conductivité, température, O<sub>2</sub> dissous) est déterminée et des sédiments sont prélevés au milieu du lac pour l'analyse des formes du phosphore.

Depuis 1993, des enquêteurs ont été formés pour suivre l'évolution des exploitations agricoles. Les enquêtes s'intéressent à l'organisation sociale des usagers de l'eau, au problème de l'accès à la ressource et aux conflits qu'elle peut engendrer. Les temps de pompages et les surfaces irriguées sont notés quotidiennement. Les productions agricoles sont estimées et un suivi de leur commercialisation est réalisé. 203 exploitants agricoles situés autour de 15 lacs du réseau font l'objet de ces enquêtes exhaustives.

## 2.2. Méthode du bilan hydrologique

Sur un intervalle de temps  $t$ , l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle de l'application du principe de la conservation des volumes d'eau (2). Elle peut s'écrire :

$$\Delta V = (V_r + V_{ecs} + V_p + V_f) - (V_{ev} + V_d + V_{vi} + V_i + V_u) \quad (1)$$

$\Delta V$  : variation de stock dans la retenue. Elle est connue très précisément à partir de l'enregistrement limnigraphique et de la courbe de cubature de la retenue (une donnée toutes les cinq minutes pour une variation de hauteur de 1 cm du plan d'eau).

**Vr** : apports en provenance du ruissellement des versants.

**Vecs** : apports souterrains.

**Vp** : apports des précipitations tombant directement sur la retenue. Ils sont connus précisément à partir des enregistrements pluviographiques et de la courbe hauteur/surface de la retenue.

**Vf** : apports dus à la fonte des neiges. Ils sont nuls pour la plupart des retenues étudiées. Ils existent en hiver pour les lacs d'altitude, mais représentent, à l'échelle annuelle, une quantité souvent négligeable.

**Vev** : volume d'eau évaporé. Il est connu en multipliant l'évaporation journalière par la surface moyenne de la retenue le même jour.

**Vd** : volume d'eau sortant de la retenue par déversement. Il est connu avec une bonne précision lorsque le déversoir est étalonné. Pour la plupart des lacs, on se contente d'appliquer une formule de déversoir adaptée à sa géométrie.

**Vvi** : volume sortant par la vanne de vidange. Il est connu par l'intermédiaire des observateurs qui notent les cotes de début et de fin de vidange ainsi que la durée de la vidange.

**Vi** : pertes par infiltration. Les infiltrations à travers la digue sont estimées à partir de mesures ponctuelles des débits ; les infiltrations vers les nappes sont connues par bouclage du bilan.

**Vu** : volume d'eau prélevé pour divers usages. Il est estimé à partir d'observations simples : observation des temps de pompage ou estimation à partir des surfaces cultivées.

L'application de ce bilan hydrologique à l'échelle mensuelle permet de comparer l'écoulement annuel au volume de la retenue, le rapport entre ces deux grandeurs donne une idée sur le remplissage au cours de l'année. Elle permet également d'apprécier les volumes d'eau s'infiltrant vers la nappe. Ces derniers sont confrontés au rehaussement du niveau piézométrique observé dans quelques puits villageois.

### 2.3. Reconstitution des apports immédiats au cours d'un événement pluvieux

De l'équation 1, on tire la quantité **Vr + Vecs** qui représente l'écoulement naturel de l'oued à l'entrée de la retenue :

$$\mathbf{Vr + Vecs = \Delta V - Vp - Vf + Vev + Vd + Vvi + Vu} \quad (2)$$

Les apports les plus importants aux retenues se font par le ruissellement direct des eaux de pluies sur les versants. Ils constituent des crues concomitantes des averses. Ces crues sont bien définies sur l'hydrogramme de la retenue. Elles durent quelques heures. Pendant la durée de la crue, l'équation de bilan peut se simplifier de la façon suivante :

$$\mathbf{Vr = \Delta V - Vp + Vd + Vvi} \quad (3)$$

En dérivant l'équation 3 par rapport au temps, on obtient :

$$\mathbf{Qe = d\Delta V/dt - dVp/dt + Qs + dVvi/dt} \quad (4)$$

Avec :

$Q_e$  = débit entrant dans la retenue en  $l.s^{-1}$  ;

$d\Delta V/dt$  = la différence de volume stockée pendant le temps  $t$  (ici cinq minutes), rapportée au milieu de l'intervalle de temps ;

$dV_p/dt$  = la différence de volume précipitée pendant le temps  $t$ , rapportée au milieu de l'intervalle de temps ;

$Q_s$  = débit sortant par le déversoir et calculé à partir de la formule hydraulique du seuil ;

$dV_{vi}/dt$  = la différence de volume évacué par la vanne de vidange pendant le temps  $t$ , rapportée au milieu de l'intervalle de temps.

Cette méthode permet de reconstituer les crues naturelles entrant dans le réservoir. Elle permet également de simuler les crues exceptionnelles sur un réservoir pour différentes cotes du plan d'eau et d'estimer le risque de débordement sur la digue.

#### 2.4. Estimation du transport solide et du volume de sédiment capturé par la retenue

La bathymétrie de la retenue se fait par sondages ponctuels du fond de la retenue suivant des transversales matérialisées par un câble tendu entre les deux rives. Les extrémités de chaque transversale sont nivelées et positionnées sur le plan de récolement de la retenue. Chaque point sondé (environ 500 par lac) est défini par trois coordonnées cartésiennes (situation et profondeur). Une géostatistique par la méthode du Krigeage (3) permet d'établir la relation "hauteur / volume" du lac. Le volume de vase est établi par différence des volumes utiles d'une année à l'autre. La retenue se comporte comme un piège à sédiments et, lorsqu'elle n'a pas déversé, le volume de vase correspond au transport solide total produit par le bassin. En cas de déversement, on attribue aux volumes déversés une concentration moyenne de matière en suspension, obtenue par échantillonnage.

La reconstitution des transports solides, crue par crue, assimilés à l'érosion globale du bassin, utilise une forme de l'équation universelle des pertes en terres développée en 1975 par **Williams** et présentée par **Hadley et al** en 1985 (1). Cette équation s'écrit :

$$A = \alpha(Vq_p)^{\beta}K(LS)CP \quad (5)$$

Où

**A** représente l'apport en tonnes de sédiments ;

**V**, le volume de la crue naturelle entrant dans le réservoir, en  $m^3$  ;

**q<sub>p</sub>**, le débit de la pointe de crue, en  $m^3s^{-1}$  ;

**K**, le facteur d'érodibilité du sol (il se mesure sur parcelle de référence et n'a pas d'unité) ;

**(LS)**, le facteur exprimant la longueur et le degré d'inclinaison de la pente ;

**C**, le facteur de couverture végétale ;

**P**, le facteur des pratiques conservatrices effectuées sur les versants ;

$\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres qui, dans le système unitaire international, prennent respectivement les valeurs  $\alpha = 11,8$  et  $\beta = 0,56$ .

Le produit **K(LS)CP** est caractéristique d'un bassin pour une saison donnée et peut être calculé par optimisation en comparant la somme des transports solides obtenue entre deux mesures de bathymétrie au volume de sédiments capturé par la retenue, augmenté de celui passé au-dessus du déversoir.

Cette méthode permet d'estimer les volumes piégés dans les réservoirs et de les comparer au volume transité en aval. Elle est utilisée également pour avoir une estimation de la durée de vie des retenues.

### 3. RÉSULTATS

#### 3.1. Bilan hydrologique et estimation de la recharge des nappes

Au cours de l'année hydrologique 1995-1996 (un cycle hydrologique débute le 1<sup>er</sup> septembre et finit le 31 août suivant, en climat méditerranéen), les lacs ont eu d'excellents coefficients de remplissage ; seules neuf retenues sur 26 n'ont pas déversé. L'écoulement a été supérieur à la capacité initiale de la retenue dans 80% des cas et, dans 50% de ceux-ci, il a été deux fois plus grand. En définissant le coefficient de remplissage annuel comme le rapport entre le volume écoulé et la capacité initiale du réservoir, la figure montre que, dans 27% des cas, ce coefficient a été supérieur à 5 et dans 19% des cas inférieur à 1. Cette année a été pluvieuse dans la zone semi-aride tunisienne, proche de la centennale humide dans sa partie septentrionale (Cap Bon), proche de la quinquennale humide dans sa partie orientale (le long de la frontière algérienne) et entre la décennale et la vicennale humide dans sa partie occidentale (Kairouanis).

Le calcul des volumes infiltrés au courant de cette même année montre une recharge effective des nappes alluviales pour 14 unités sur 26. Des puits de surface, en aval de la retenue, ont vu leur niveau d'eau s'élever de plus de 20 m. C'est le cas du lac d'El Gouazine, au pied du Jebel Serj, où l'eau de deux puits, en aval de la retenue, a remonté d'environ 30 m depuis la construction du barrage en 1990. Le calcul du volume infiltré pour l'année 1995-1996 a donné une valeur de 275 000 m<sup>3</sup> (125 % du volume de la retenue). La remontée de la nappe a été de 2m pour la période automnale 1995. Ces remontées d'eau s'accompagnent parfois d'une détérioration de la qualité chimique de l'eau. Dans le cas d'El Gouazine, la concentration en substances dissoutes est de 2 g .l<sup>-1</sup> dans le lac et de 3,5 g .l<sup>-1</sup> dans les puits.

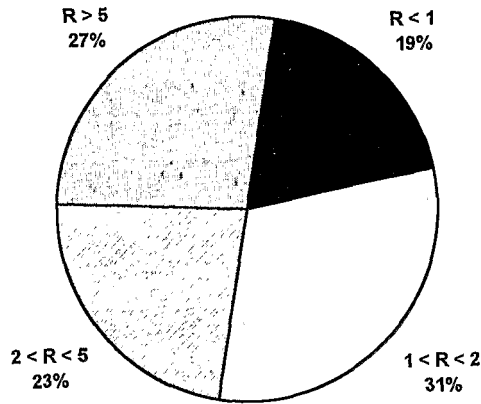


Figure 1 : Rapport écoulement de l'année 1995-1996 sur volume de la retenue pour 26 lacs collinaires de Tunisie.

Figure 1 : Ratio flow of the year 1995-1996 on reservoir volume for 26 Tunisian hill reservoirs.

### 3.2. Reconstitution des crues naturelles, estimation des risques pour les ouvrages

L'application de l'équation 4 aux données de l'épisode orageux du 20 au 25 septembre 1995 recueillies à El-Gouazine permet la reconstitution des crues qu'il a provoquées et le tableau 1 consigne les principaux paramètres. Sur le graphique (figure 2), on a superposé l'hydrogramme de la crue reconstituée, l'hydrogramme de déversement dans l'évacuateur de crues et le hétérogramme des averses. La première crue, avec un volume de 151 000 m<sup>3</sup>, remplit la retenue sans déverser. Les crues du 23 et du 24, avec un volume de 137 000 m<sup>3</sup>, donnent lieu à un déversement de 92 000 m<sup>3</sup>. On remarque un fort laminage de la pointe de crue (environ 40 %) en sortie du déversoir.

Tableau 1 : Paramètres des crues reconstituées pour l'épisode orageux du 20 au 25 septembre 1995. Lac d'El-Gouazine - Bassin versant d'une superficie de 18,1 km<sup>2</sup>.

Table 1 : Parameters of floods reconstituted for the stormy events of September 20<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> 1995. Lake at El-Gouazine - Watershed surface of 18.1 km<sup>2</sup>.

Crue	pluie aval mm	Int. 5mn aval mm/h	pluie amont mm	Int. 5mn amont mm/h	Volume total m <sup>3</sup>	Volume déversé m <sup>3</sup>	Tm mn	Tb mn	Qmax ruiss l/s	Qmax dévers l/s	Kr %
20/09/95	27,0	60	32,5	96	151 000	0	110	260	36 700	0	28,0
22/09/95	9,5	30	16	78	43 500	16 600	70	315	5 670	1 500	18,8
23/09/95	7,5	30	10,5	54	93 500	75 400	85	480	11 300	4 500	57,4
24/09/95	21,5	90	6,5	18	20 500	561	15	85	6 660	27	8,1

Int. = intensité de pluie, Tm = temps de montée, Tb = temps de base, Qmax = Débit de pointe, Kr = Coefficient de ruissellement.

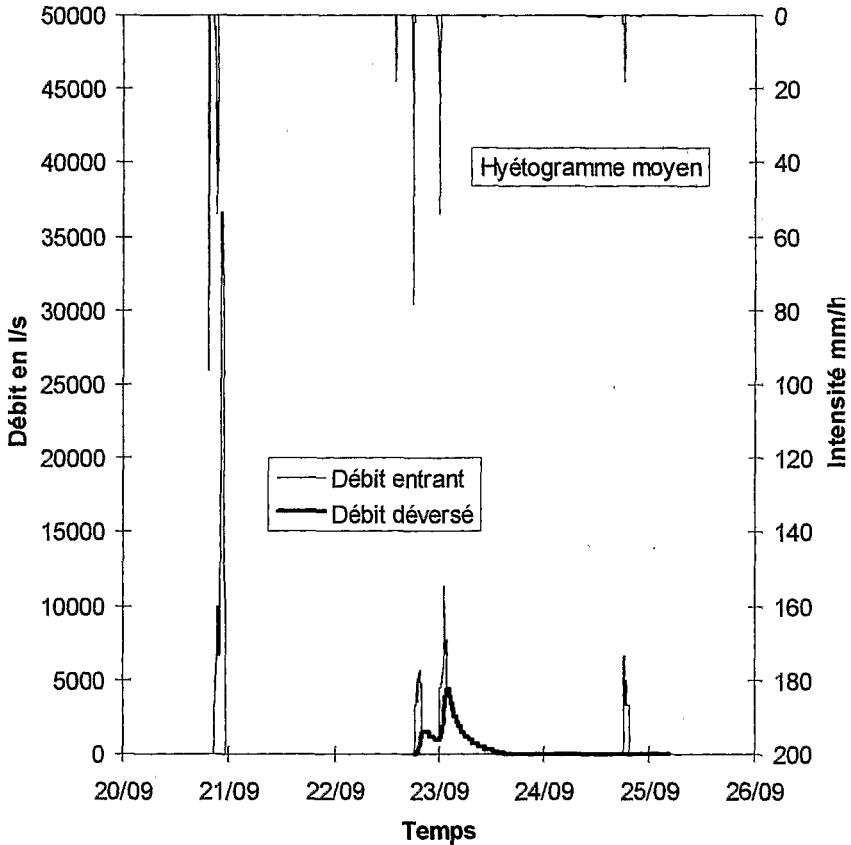


Figure 2 : Reconstitution des écoulements durant l'épisode orageux du 20 au 25 septembre 1995 à El Gouazine.

Figure 2 : Reconstitution of flow during the stormy events of September 20<sup>th</sup> to 25<sup>th</sup> 1995 at El Gouazine.

Pour chaque retenue, nous avons choisi la plus forte crue observée depuis le début des mesures (1993) pour réaliser une simulation du fonctionnement du déversoir en cas de forte crue. Nous avons fait l'hypothèse que cette crue survenait sur un lac prêt à déverser (niveau d'eau à la cote du déversoir). Nous avons reconstitué l'hydrogramme sortant par le déversoir et les hauteurs résultantes dans la retenue pour voir si cette crue ne dépassait pas le sommet de la digue. Cette reconstitution considère une pente de l'eau nulle dans la retenue et un temps de propagation de l'onde de crue négligeable dans la retenue. Pour chaque pas de temps  $dt$ , on calcule le volume entrant, le volume sortant et la cote résultante. On réitère ce calcul depuis le temps  $t_0$ , début de la crue, jusqu'au temps  $t_f$ , fin du ruissellement. Pour deux barrages sur 26, cette simulation a montré un risque de débordement.



La figure 3 donne une représentation graphique de ces reconstitutions pour les barrages de Sadine 2 (barrage effectivement endommagé par un débordement) et M'Rira, (barrage pour lequel un rehaussement de la digue est intervenu). La simulation montre qu'avec l'ancienne hauteur de digue, la crue arrivant sur un plan d'eau à la cote du déversoir aurait dépassé la digue.

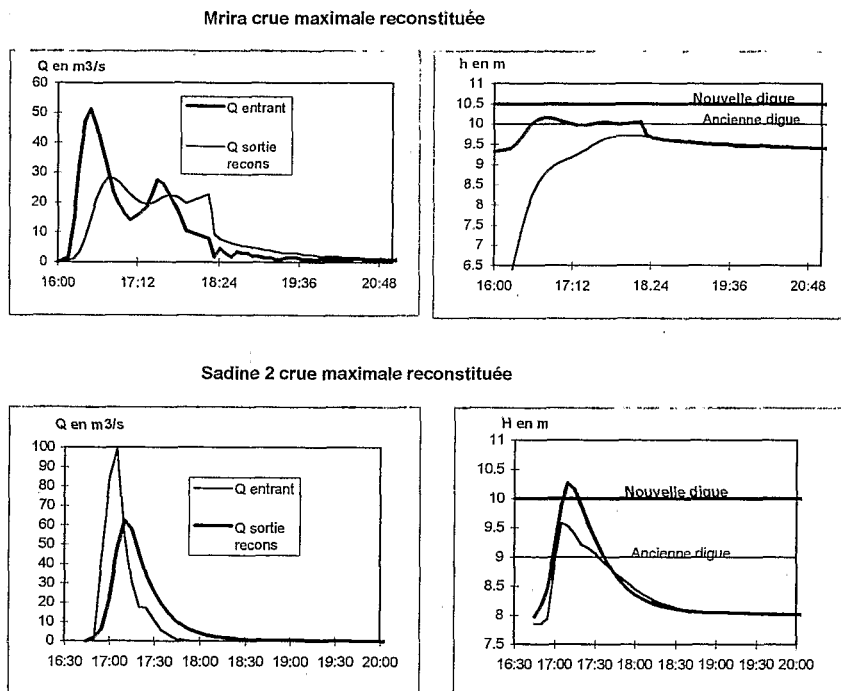


Figure 3 : Simulation des crues maximales survenant sur un plan d'eau à la cote du déversoir.

Figure 3 : Simulation of maximal floods occurring on a lake at the same height than the spillway.

### 3.3. Estimation de l'érosion, volume de sédiments piégés et durée de vie des retenues

La figure 4 montre la reconstitution des pertes en sols crue par crue du 08/10/1992 au 15/08/1996 pour un barrage construit en 1989 dans une zone très sensible à l'érosion (barrage de Sadine1). Son bassin versant a une superficie de 384 ha dans une zone montagneuse sur marne et calcaire. Le poids total des sédiments exportés par le bassin versant

est de 48 500 t ( $32 \text{ t.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ ) ; 56% de ces pertes en sol sont dues aux deux seuls orages du 23/08/1995 (7 700 t, soit  $20 \text{ t.ha}^{-1}$ ) et du 04/09/1995 (18 300 t, soit  $48 \text{ t.ha}^{-1}$ ). Le lac collinaire a piégé 90% du transport solide total et est aujourd'hui pratiquement complètement colmaté.

Les 24 unités "lacs collinaires", bien suivies par des mesures d'envasement depuis 1993, avaient une capacité initiale totale de stockage de  $2\,615\,000 \text{ m}^3$  ; elles ont perdu  $430\,000 \text{ m}^3$ , soit 16,5% pour une durée d'existence moyenne de 4,7 années. Soit une perte moyenne de 3,5 % de la capacité de stockage par an. Suivant les sites, l'importance de l'envasement est très variable. Pour comparer l'envasement des différentes retenues, on a rapporté leur perte de volume à l'unité de surface de leur bassin et à l'année. Cette grandeur exprimée en  $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  varie de 1,2 à 22,7 (moyenne 9,8 et écart type égal à 6).

En faisant l'hypothèse que la moyenne de l'envasement sur cette période est représentative du régime hydrologique (une année excédentaire pour deux années sèches), on peut estimer une durée de vie moyenne des barrages (comblement jusqu'à la cote du déversoir) : 25% des lacs auraient une durée de vie inférieure à 20 ans et environ 36% une durée de vie supérieure à 50 ans. La durée de vie moyenne de l'ensemble des lacs serait de 29 années. Cette estimation n'est, bien sûr, qu'indicative : l'exemple de Sadine présenté ci-dessus montre bien que l'envasement de ces petites unités est plus le fait d'événements isolés que d'une accumulation progressive dans le temps.

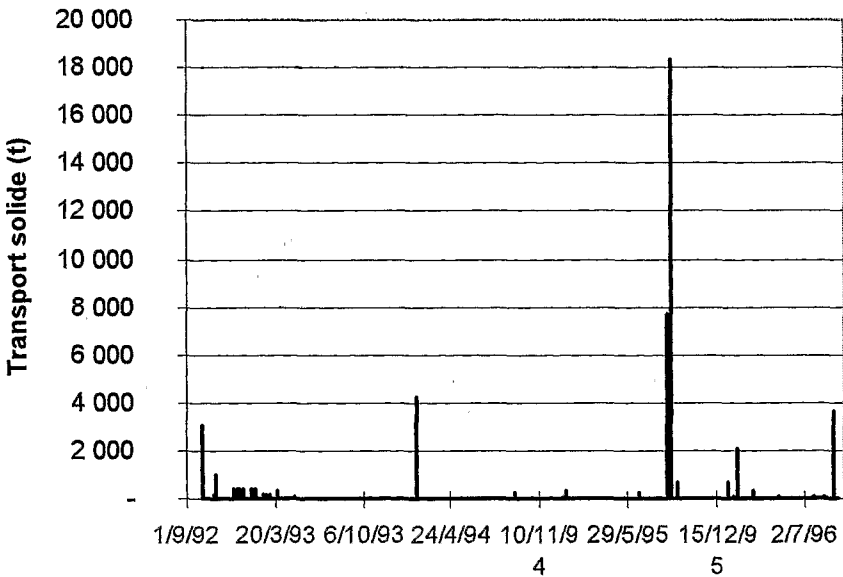


Figure 4 : Transport solide, crue par crue, sur le bassin de Sadine 1.  
*Figure 4 : Soil losses for each flood event on the watershed of Sadine 1.*

En extrapolant le volume moyen de vase piégée par ces 24 unités aux 1000 prévues, on obtiendrait un volume de vase piégée de  $3,8 \text{ Mm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$ .

### 3.4. Qualité chimique des eaux

Les différentes mesures sur le terrain et analyses au laboratoire montrent une importante variabilité de la salinité des lacs tant dans l'espace que dans le temps. En hautes eaux, la conductivité électrique varie sur les 26 lacs de  $0,23 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$  à  $3,58 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$  et en basses eaux de  $0,31 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$  à  $4,65 \text{ ms} \cdot \text{cm}^{-1}$ . On observe cinq faciès géochimiques différents : sulfaté calcique, calcique sodique, bicarbonaté calcique, chloruré sodique et mixte. Aucun lac ne montre de signes d'eutrophisation pour l'instant. Ils sont de construction récente, moins de 10 ans et en moyenne 4,7 ans.

### 3.5. Usage de l'eau, retombées sociales et économiques

L'analyse de la diversité de fonctionnement des systèmes de production agricole autour des lacs réalisée en 1996 montre que (4) :

- 50% des exploitants n'ont pas introduit l'irrigation et conservent leur système de production traditionnel ;
- 28% commencent à intégrer le facteur eau dans leur fonction de production agricole ;
- seulement 22%, pouvant être appelés pionniers, pratiquent la petite irrigation.

Le taux d'exploitation des lacs collinaires est faible, mais très variable d'un site à l'autre. Sur le site de Kemech, dans le Cap-Bon, la retenue est équipée de huit motopompes ; des périmètres de cultures industrielles (12 ha de tomates, avec un rendement moyen de  $35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , et piments) et des jardins maraîchers traditionnels y cohabitent. D'autres sites, plus isolés des marchés, restent peu ou pas exploités, comme les sites Dékikira ou El Hnach dans le centre du pays.

L'usage de l'eau permet d'introduire de nouvelles spéculations (notamment le maraîchage et l'arboriculture) très rentables dont la marge brute peut atteindre 10 fois celle de la céréaliculture traditionnelle extensive. Cette exploitation optimale de l'eau des lacs collinaires est à l'origine de la création d'un supplément de revenu annuel important, qui se traduit par l'amélioration de l'habitat et une spéculation foncière sur les terres jouxtant les lacs.

L'envasement rapide de certaines retenues a déçu les agriculteurs. Huit hectares de pommiers plantés dans les trois premières années d'existence du lac de Sadine (Haut bassin du Zéroud) souffrent du manque d'eau pendant l'été. La retenue est comblée de sédiments à 90%.

#### 4. CONCLUSION

Cette brève rétrospective sur les données et analyses fournies par un réseau d'observations composé de 26 unités représentatives des lacs collinaires de la zone semi-aride tunisienne permet déjà quelques conclusions.

Les retenues sont dans leur majorité bien dimensionnées, les risques de débordement sont faibles et le remplissage en année pluvieuse est correct.

L'objectif de recharger la nappe alluviale et d'alimenter en eau les puits de surface a été atteint dans plus de 50% des cas. Il faut savoir que la Tunisie compte 130 000 puits de surface permettant l'irrigation de la moitié des périmètres dans le pays et faisant vivre 0,5 M d'habitants. Il ne faut pas cependant négliger les possibilités de dégradation de la qualité de ces eaux souterraines. L'évaporation, forte dans ces régions, concentre les sels dans les lacs.

Ces lacs sont de très bons pièges à sédiments. Mais leur colmatage rapide va à l'encontre d'un développement agricole. Implantés dans des environnements fragiles et à faibles activités économiques, ils sont perçus comme une ressource supplémentaire, rare et vitale : l'eau. Pour pérenniser cette ressource, l'aménagement des versants pour protéger ces lacs devient une priorité. La nature et la densité de ces aménagements doivent concilier la réduction du transport solide sans pour autant priver le lac de ces apports en eau par ruissellement.

Ces observations montrent que le choix des sites d'implantation doit être en rapport avec des objectifs précis qu'ils soient d'ordre conservatoire ou délibérément orientés vers le développement rural. Dans le premier cas, un lac, qui aura permis la mise en place d'un reboisement ou d'une plantation d'oliviers avant de s'ensabler, aura rempli son rôle. Le coût de l'opportunité de l'eau du lac collinaire doit être comparé à celui de l'eau tractée en citerne pour mettre en place la même plantation. Dans le second cas, la pérennité de la ressource doit être prioritaire. Elle pose les problèmes de responsabilité et de partage des droits et des devoirs de maintenance et d'usage de ressources naturelles renouvelables et d'une protection d'un environnement à statut collectif.

Ce travail en Tunisie a été repris dans une initiative de recherche de l'Union européenne pour une généralisation à l'ensemble du pourtour méditerranéen sous le nom de programme Hydromed.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) HADLEY R.F., LAL R., ONSTAD C.A., WALING D.E., YAÏR A., 1985. - Recent developments in erosion and sediments yield studies. UNESCO, Paris.
- (2) NOUVELOT J.F., 1993. - Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale. CIEH / ORSTOM / CEMAGREF / FAO, Montpellier, 500 p.
- (3) MATHERON G., 1965. - Les variables régionalisées et leur estimation. Paris, Masson, 360 p.
- (4) SELMI S., 1996. - Interventions de l'Etat en milieu rural et réactions des collectivités locales face à la gestion d'une ressource rare. Les lacs collinaires dans le semi-aride tunisien. Thèse de doctorat. Montpellier, ENSAM, 400 p.
- (5) TALINEAU J.C., SELMI S. et ALAYA K., 1994. - Lacs collinaires en Tunisie semi-aride. Sécheresse. Note originale. n° 4, Vol. 5, 251-256.

(Reçu le 5 février, accepté le 19 mars 1997)

## Discussion

**M. Durand (\*)**. – Quel est le pourcentage de perte en eau par évaporation pour ces microbarrages ?

**M. Albergel**. – L'évaporation est forte dans toute la zone semi-aride tunisienne. Mesurée sur bac de 1 m<sup>2</sup> enterré sur une rive très proche du lac collinaire, elle varie de 1 200 mm à 2 000 mm par an en fonction de la proximité de la mer et de l'exposition aux vents. Les maximums journaliers atteignent 15 mm en été pour des bacs au sud-ouest de la dorsale.

À partir des bilans hydrologiques calculés sur 26 lacs, on estime que les pertes par évaporation atteignent 21,8 % de l'écoulement annuel avec un maximum de 50,5 % sur un lac peu profond et bien alimenté, un minimum de 3,7 % sur un lac qui reste sec l'été. La médiane est 16,9 % et l'écart type de 15 %.

**M. Leprun**. – Dans le Nordeste brésilien, les pertes par évaporation des petits barrages (*açudes*) varient entre 2,0 et 2,6 m par an. L'évaporation en station des bacs de classe A dépasse généralement 3 m par an.

**M. Skouri (\*\*)**. – 1. Quelle est l'importance de la mobilisation des eaux de surface et de l'alimentation des nappes ?

2. Quels sont les critères de choix des lacs collinaires, en plus des études techniques relatives aux aspects topographiques ? Dans quelle mesure tient-on compte des aspects fonciers et socio-économiques ?

3. Prévoit-on des mesures de protection de l'amont du bassin versant pour éviter l'envasement rapide des lacs ?

4. Comment expliquer l'augmentation de la salinité des nappes et que celle-ci soit supérieure à celle des eaux du lac ?

5. Y a-t-il concurrence ou complémentarité entre les grands barrages et les lacs collinaires ?

**M. Albergel**. – 1. Après l'achèvement de la Stratégie nationale de Conservation des Eaux et des Sols en l'an 2000, les lacs et barrages collinaires mobiliseront environ 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, ce qui représente environ 2 % du capital en eau connu de la Tunisie (4,5 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>). À partir des mesures faites sur 26 lacs collinaires, on estime qu'environ 30 % de l'écoulement annuel rechargent directement la nappe par infiltration au fond et sur les berges du lac. Ce taux est appelé à diminuer avec le colmatage des réservoirs. Des lâchers d'eau à faible débit, en aval du réservoir, permettent aussi une recharge efficace.

2. Au début de la Stratégie nationale, les critères pour choisir les sites des lacs collinaires étaient surtout d'ordre technique, le verrou topographique pour édifier le plus facilement la digue était la priorité. Les aspects socio-économiques sont de plus en plus pris en compte pour les nouveaux lacs collinaires. La connaissance du milieu par les agents de la CES dans les régions joue un grand rôle dans le choix des sites. Les aspects fonciers ne sont étudiés que pour les unités dépassant 500 000 m<sup>3</sup>, puisqu'un dédommagement des terres inondées n'intervient que dans ce cas. Après la mise en eau des petites unités, les aspects socio-économiques sont pris en compte et les propriétaires expropriés sont souvent dédommagés par le don d'une motopompe.

---

(\*) Correspondant de l'Académie. Directeur du Département Biologie du groupe OHF.  
(\*\*) Membre de l'Académie.

3. En principe, le lac n'est qu'un élément des mesures conservatoires et ses versants sont aménagés. Dans plusieurs cas, ces aménagements de versants n'interviennent que bien après la construction du lac. La qualité et la densité de ces aménagements doivent répondre à un optimum difficile à atteindre. Ils doivent freiner le ruissellement sans trop ponctionner l'alimentation du lac. Ils doivent être acceptés par les agriculteurs et éleveurs installés en amont du lac.

4. On a remarqué, dans quelques cas, une augmentation de la concentration en sel de certains puits après la construction du lac collinaire. Les sels se concentrent dans les eaux du lac par évaporation avant de s'infiltrer. Ces concentrations les plus fortes s'observent souvent lorsque le lac s'est asséché.

5. Les nombreux lacs collinaires qui peuvent être construits en amont d'un grand barrage servent à le protéger contre l'envasement en piégeant une partie importante du transport solide. En année sèche, ils risquent de diminuer les apports au grand barrage. En cas de forte précipitation, le risque d'une rupture en cascade des digues des barrages collinaires représente un danger pour le grand barrage dont l'évacuateur de crue a été dimensionné en fonction d'un régime hydrologique naturel du bassin versant. Les plans directeurs d'aménagement hydraulique d'un grand bassin versant doivent chercher une exploitation optimale de la ressource en eau en minimisant les risques. Il existe des modèles hydrologiques pouvant simuler le fonctionnement du bassin aménagé. Ces modèles sont d'autant plus fiables que le régime naturel est bien connu. L'importance de mesures sur les crues exceptionnelles de 1969 en Tunisie apporte de précieux renseignements pour la calibration de ces modèles.

**M. Leprun.** – Sur le socle cristallin du Nordeste brésilien, il n'y a pas de nappes phréatiques importantes comme cela est le cas sur roches sédimentaires, mais seulement des remplissages de fissures de roches de faible volume. Après passage à travers les sols et les altérations riches en minéraux altérables, et au contact des roches cristallines, les teneurs en sels de ces eaux de remplissage peuvent atteindre plusieurs grammes par litre. Les eaux des retenues qui proviennent du ruissellement des eaux de pluie ne sont jamais aussi chargées.

**M. Dubreuil (\*).** – 1. Sachant qu'un réservoir est d'autant moins bien alimenté et d'autant plus irrégulièrement qu'il y a plus de petits réservoirs en amont, quelle serait la politique optimale d'économie de l'eau : beaucoup de petits barrages ou plutôt des grands ?

2. Une bonne gestion des ressources en eaux et en sols dépend de la prise de décision par les collectivités rurales et l'optimum est à rechercher en commun à l'échelle du bassin versant à partir de l'analyse des diverses spéculations agrosylvo-pastorales envisageables.

**M. Albergel.** – 1. Pour de nombreux pays du pourtour méditerranéen, la politique de construction de grands barrages qui a débuté dans les années soixante s'est essouffée durant la décennie quatre-vingt. Les sites les plus faciles ont été aménagés. Les grands barrages remplissent à peu près leur rôle d'alimentation en eau, de production d'énergie, mais ont donné de moins bons résultats pour la grande irrigation : mauvais entretien des périmètres agricoles, dégradation des sols irrigués, problèmes de remontée et de pollution des nappes phréatiques. Le coût de réalisation des grands barrages (dédommagement des terres inondées, sécurité de l'ouvrage) a augmenté tandis que les bailleurs de fonds pour le développement devenaient de plus en plus réticents pour financer ces infrastructures. La prise en considération de plus en plus aiguë des impacts environnementaux des grands barrages a freiné leur développement ces dernières années. Au

(\*) Correspondant de l'Académie. Directeur des relations extérieures du Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD).

contraire, les petits barrages apparaissent comme des infrastructures qui ne créent pas de nuisance dans l'environnement et qui s'intègrent facilement dans les systèmes traditionnels de production. Cette hypothèse reste à vérifier sur le long terme.

2. Cette remarque est fondée sur le bon sens. En matière d'aménagement du territoire, de nombreux intérêts se confrontent : intérêt de l'État, intérêt de l'investisseur, intérêt des entreprises et intérêt du paysan. Le point le plus délicat est de connaître les motivations des prises de décision de tous ces intervenants et éventuellement de les infléchir.

**M. Leprun.** - L'eau des grands barrages, qui sont des constructions publiques, n'est pratiquement pas utilisée (ou trop peu) par les populations rurales alentour du fait des problèmes fonciers, d'accès et d'usage de la terre et de l'eau. C'est le cas dans le Nordeste brésilien, mais également dans le Sahel et au Burkina Faso en particulier. Les petits barrages construits par les petits producteurs ruraux représentent, à mes yeux, pratiquement la seule solution pour une politique optimale de gestion et d'économie de l'eau dans ces régions.

**M. Lery (\*).** - On n'a peut-être pas toujours le choix entre le grand barrage et les barrages collinaires. C'est, je pense, sous la dépendance des conditions topographiques. J'ai participé à deux programmes très différents : l'un en Algérie sur le Bou Namoussa, pour l'irrigation de la Plaine d'Annaba, au moment de l'Indépendance. La distribution de l'eau, dans la plaine de 30 000 ha, a été très difficile et très lourde du point de vue financier. Le problème de la salinité de l'eau n'avait pas été prévu et a compliqué son utilisation. Le deuxième projet, dans les années soixante, concernait l'irrigation des plaines de la Marina et de la Casinca, au sud de Bastia, pour développer la culture fruitière et assurer l'approvisionnement d'une future conserverie de 25 000 t/an, à Ghisonnacia ; l'usine, dont le projet était suivi par la SOMIVAC (Société pour la mise en valeur de la Corse), n'a, pour des raisons mystérieuses, jamais été réalisée - la Corse a manqué une occasion !

Ma question : a-t-on fait des comparaisons entre le coût d'un grand barrage (y compris la distribution) et celui d'un ensemble de barrages collinaires équivalent en volume ?

**M. Albergel.** - En Tunisie, le budget prévu par la Stratégie pour mobiliser  $10^8$  m<sup>3</sup>/an dans des petits barrages est de 250 M US\$, soit un prix de revient du m<sup>3</sup> stocké de 2,5 US\$. Pour un grand barrage, le prix du m<sup>3</sup> stocké est de l'ordre de 0,5 US\$.

La rentabilisation d'un grand ouvrage se fait en général par la production énergétique ; la production d'eau pour l'agriculture, l'industrie ou l'alimentation des villes ; la régularisation d'un fleuve pour la navigation ou pour la protection.

Les principaux impacts des petits ouvrages sont d'ordre social, environnemental et difficilement évalués en termes monétaires.

On peut, aussi, ajouter que le m<sup>3</sup> de sédiments piégés dans un grand barrage a un prix négatif. Il est positif dans une petite retenue puisqu'il n'est pas arrivé dans la grande retenue.

**M. Guillard (\*\*).** - Ma première remarque concerne les lacs collinaires tunisiens. Les photos présentées témoignent de l'accès libre des hommes et des animaux à ces plans d'eau. Il paraît indispensable de les enclore pour éviter la dégradation des berges et la pollution des eaux et prévoir des systèmes sûrs de prélèvement des eaux. Est-ce prévu ?

(\*) Membre de l'Académie. Ancien directeur de l'Institut Appert.

(\*\*) Correspondant de l'Académie. Ingénieur général honoraire du Génie rural, des Eaux et des Forêts.

En ce qui concerne le Nordeste brésilien, j'aimerais savoir si le "*Departamento nacional das obras contra secas*" (DNOCS), chargé des grands "*açudes*" en cas de sécheresse catastrophique, existe toujours et ce qu'il fait. D'autre part, ayant été, en 1959, à l'origine du projet de développement de périmètres irrigués à partir du Rio San Francisco, je souhaiterais connaître le développement actuel de ce projet.

**M. Albergel.** - En Tunisie, l'eau des lacs est très peu utilisée pour les besoins domestiques. La majorité de la population a accès à l'eau courante. Les habitats isolés se ravitaillent plutôt par puits, forages, fontaines ou citernes. Les berges des lacs, comme les digues, sont souvent protégées contre l'érosion par des plantations arbustives ou herbacées.

**M. Leprun.** - Depuis des décennies, après chaque grande sécheresse dans le Nordeste brésilien, un organisme est créé pour tenter d'y faire face. Cela a été le cas du DNOCS créé en 1945 et basé à Fortaleza. Il a été mis en extinction, il y a quelques années. Pour l'aménagement de la vallée du São Francisco, des organismes directeurs ont été créés : SUVALE (Surintendance de la vallée de São Francisco en 1961 ; compagnie hydroélectrique CHESF en 1974 ; CODEVASP (compagnie de développement de la vallée du São Francisco) en 1975, pour ne citer qu'elles. On assiste, depuis quelques années, à un développement spectaculaire des cultures industrielles agricoles irriguées dans la région de Petrolina (vigne, arbres fruitiers parmi lesquels le manguier et la goyave notamment). Le projet pharaonique d'irriguer tout le Nordeste sec à partir de canaux partant du Rio São Francisco, envisagé dès 1847 et repris très sérieusement en 1980, a été (provisoirement ?) abandonné.