
HYDROMED

Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen

Project of research on hill reservoirs in the semi arid zone of Mediterranean periphery

J. ALBERGEL¹, S. NASRI², J.-M. LAMACHÈRE³

Reçu le 19 septembre 2002, accepté le 24 avril 2003*.

SUMMARY

A hill reservoir is a small lake resulting from a small dam. Hill reservoirs contain fifty thousand to one million m³ of runoff water from watersheds whose areas range from a few hectares to several km². They are integrated in a natural way within the landscape and do not create any particular pollution problems. They regulate water flow and thus help to maintain populations in place, ensuring for them real possibilities of development. Their construction has several objectives:

- protection of downstream infrastructures against floods and erosion;
- assuring availability of water at several places in the landscape for domestic needs, watering cattle, micro-irrigation, and water harvesting for refilling shallow groundwater reserves;
- development of new economic activities: irrigation, breeding, fishing and fish farming, tourism, and improvement of the environment (creation of oases, afforestation, etc.)

The HYDROMED research project was undertaken in four countries (Lebanon, Morocco, Syria and Tunisia) where a strong policy favouring the building of small dam is going on in parallel to the construction of large dams. The goal of the HYDROMED project is to assess the impact of these hydrau-

- Characterization of the water and soil environment;
- Examination of agronomy, agricultural economy and the social management of water;
- Sustainability of the hill reservoir and its integration into sustainable development of marginal regions.

After an analysis and synthesis of these projects in each country, seven test sites were chosen and a multidisciplinary approach was adopted.

All small reservoirs at the test sites were equipped with a water level gauge, an evaporation pan, and two stations for automatic data collection. One station was connected to a tipping bucket rain gauge (0.5 mm rainwater), whereas the other was connected to probes that measured water and air temperatures and water levels with 1 cm accuracy. The spillways were shaped in such a way that discharge could be estimated. Since the beginning of the project, annual records of all observations made from September to August at these test sites have been published. A computerized bank of hydrological data was set up. The parameters describing the watersheds were also recorded in a similar data bank. Maps of different watersheds were stored using a geographical information system (GIS). The main objective of this work was to build a hydrological model suitable for semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs, with two specific objectives: (i) rainfall-runoff simulation and (ii) simulation of reservoir storage capacity and probability of failure. This model, called HYDROMED (RAGAB *et al.*, 2001 a, b, c), provided the project with an accurate understanding of the water resource and allowed the evaluation of water availability for different uses.

The bathymetry of each reservoir was measured at least once every two hydrological years, and was compared with a fine resolution land survey, making it possible to determine the rate of siltation in the pond, and to establish depth/volume and depth/surface curves. At the same time, studies on sheet erosion and gully erosion were carried out in the watersheds. Solid transport varied from 1.8 t/ha/an on a small forested catchment with soil conservation management (El Gouazine in Tunisia) to 50 t/ha/an on a cultivated catchment with marl in the Rif foothills (Morocco). A model was applied to compute the solid transport for each flood (ALBERGEL *et al.* 2003). It showed that solid transport is not a linear function of time and noted, for example, that 3 floods were responsible for 50% of the sedimentation that occurred in the Kamech dam (Tunisia) between the years 1994 and 2002.

Water samples were collected seasonally during the project. Electrical conductivity (E.C.) and pH were measured and the concentrations in the major ions were determined (RAHAINGOMANANA, 1998). The geochemical characterization of the water in hill reservoirs showed three major groups: calcium sulphate water types, calcium bicarbonate dominated waters and sodium chloride dominated waters. The observations made during different hydrological periods aided in the understanding of the present geochemical evolution of water and confirmed the importance of reservoir hydrology in this evolution. Simulations with the Expreso model (RIEU *et al.*, 1997) were used to estimate the risk of water quality deterioration due to evaporation.

An agronomic survey was carried out in Tunisia on water requirements for the main cropping systems and for different irrigation systems (traditional, sprinkler or drip irrigation) on two semi-arid sites. At the catchment scale, measurements of energy balance showed a very strong water demand throughout the year. Values of potential evapotranspiration were always greater than 4 mm/day at Kamech (Cap Bon Peninsula) and greater than 5 mm/day at El Gouazine (Central Tunisia). During winter, high potential evapotranspiration

values are due to strong winds. Micro-meteorological studies on rainfed agriculture allowed the estimation of actual evapotranspiration fluxes for hard wheat at both sites. The observed actual evapotranspiration of hard wheat (2.3 mm/day at Kamech and 1.9 mm/day at El Gouazine from mid-February to mid-May) was always less than potential evapotranspiration. Micro-meteorological measurements on a drip irrigated tomato crop showed an actual evapotranspiration rate of 6 to 7 mm/day in July for an irrigation height of 9 to 10 mm/day. Thermic stresses were observed in summer time when air temperatures exceeded 45°C (Vacher and Mougou, in HYDROMED 2001).

Economic, social and environmental studies were made using surveys with the farmers. Access to water and social organizations were studied as well as the division of responsibilities among state, collectivities and the individual. The use of water in the hill reservoirs appeared to be limited, but variable from one lake to the other. On the Kamech site in Cap Bon the dam was equipped with 4 fuel water pumps. Intensive cultivation of drip-irrigated tomatoes and peppers (10 ha) coexists with traditional irrigated gardens. There is little to no exploitation of hill reservoirs that are far from the markets. Among other uses of the reservoir water, cattle watering and domestic needs were also important. In all semi-arid Mediterranean regions, ovine breeding is an important income for farmers.

Key words: *mediterranean, water, small dams, hill reservoirs, rural hydraulic works.*

RÉSUMÉ

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 m³ d'eau recueillie sur des bassins versants d'une superficie de quelques hectares à quelques km². Ils 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.

HYDROMED est un programme de recherche mené dans quatre pays (Liban, Maroc, Syrie et Tunisie), engagés dans une politique de construction de petits barrages en complément des réalisations de grande hydraulique. L'objectif du projet HYDROMED a été d'étudier l'aménagement « lac collinaire » et ses impacts sur l'environnement proche et sur les sociétés rurales riveraines. Outre les opérations de coordination et de formation, quatre opérations de recherches ont été menées :

- Synthèse des travaux existants et choix des sites pour les expérimentations,

- Agronomie – Impacts sociaux et économiques,
- Pérennité du lac collinaire et son intégration dans le développement durable des régions marginales.

Mots clés : *méditerranée, eau, petits barrages, lacs collinaires, aménagements hydro agricoles.*

1 – INTRODUCTION

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 des sociétés du pourtour de la Mer Méditerranée. Les petits barrages de lacs collinaires, en tête de bassin versant sont des aménagements connus depuis la plus haute antiquité

(exemples : Sadd El Kafara, construit sur l'oued Garawi, à 30 km au sud du Caire sous les 3^e et 4^e dynasties (2 650-2 645 av. J.-C.), barrage sur le Nahr El Asi près de Homs en Syrie, construit sous le règne de Sethi 1^{er} (1 319 -1 304 av. J.-C.), barrages romains du début de notre ère en Italie, Espagne, France, Syrie, Tunisie, Turquie). Avec une conception moderne, ces aménagements de petite ou moyenne hydraulique se sont multipliés dans les pays du Nord de la Méditerranée après guerre et depuis la décennie 1980 dans ceux d'Afrique du Nord et du Moyen Orient (AFEID, CFGB, 1993). Leur construction vise les objectifs suivants :

- la protection des infrastructures en aval contre les crues, et la limitation de l'érosion et du transport solide vers l'aval,
- la mise à disposition d'une ressource en eau de manière disséminée dans le paysage et le captage du ruissellement pour la recharge des nappes phréatiques,
- le développement local d'activités agricoles ou récréatives et l'amélioration de l'environnement par la création d'oasis ou le reboisement.

Implantés dans des environnements fragiles et à faible activité économique, les lacs collinaires apparaissent comme des aménagements susceptibles d'améliorer les facteurs traditionnels de la production agricole en augmentant la disponibilité d'une ressource naturelle renouvelable, rare et vitale : l'eau. Cependant, l'efficacité et la durabilité des ouvrages demeurent fonction de nombreuses conditions qui vont du choix du site et de la réalisation technique des aménagements à la participation des acteurs locaux aux projets de valorisation agricole.

C'est dans ce contexte et pour répondre aux questions d'ordre environnemental et d'ordre social que posent l'utilisation du supplément de ressource en eau par les usagers que s'est développé le programme de recherche HYDRO-MED. Les problèmes de dimensionnement des ouvrages, la géotechnique des barrages et les risques de ruptures des digues n'ont pas été prises en compte dans ce programme. Ses principaux objectifs peuvent être définis comme suit :

- Analyse et modélisation du fonctionnement hydrologique des lacs collinaires en relation avec leur impluvium.
- Étude des usages de la ressource en eau et des impacts sur l'environnement et les hommes.
- Étude des conditions de la pérennité d'un lac collinaire et de son intégration dans le développement durable de la région.

2 – MATÉRIEL ET MÉTHODES

La réalisation des objectifs cités ci-dessus a reposé sur une approche multidisciplinaire mise en place par une équipe internationale de scientifiques originaires de sept institutions d'Europe et des pays méditerranéens du Maghreb et du Moyen-Orient.

2.1 Discipline 1 : Hydrologie des retenues

Pour quantifier les apports liquides et solides des petits bassins versants situés en amont des lacs collinaires, le projet HYDROMED a réalisé l'équipement de sept sites pilotes: cinq en Tunisie, un en Syrie et un au Maroc. Sur chacun de ces sites, le 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 et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au

cm près et sa température. La température de l'air est également mesurée. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. Des mesures de conductivité électrique et de pH sont effectuées à chaque visite de contrôle et de collecte des données enregistrées (en moyenne une visite tous les trois mois). Des mesures de bathymétrie et de nivellement sont réalisées périodiquement (en moyenne tous les deux ans) dans les retenues.

Ces données ont permis l'analyse du bilan hydrologique des retenues. Les débits entrant dans le lac ont été reconstitués sur des petits pas de temps (5 minutes). Les pertes par déversement, évaporation, infiltration ou utilisation de l'eau ont été calculées sur un pas de temps journalier. La figure 1 montre sur

Les données de pluie et d'écoulement recueillies sur ces sept sites ont servi à la mise au point d'un modèle hydrologique permettant la simulation de crues entrant et sortant de la retenue et le calcul de la probabilité de défaillance du barrage pour un mois donné en fonction d'une capacité initiale, d'un taux d'envasement et d'un objectif d'irrigation (RAGAB *et al.*, 2001, a, b,c).

Un site pilote où la construction du barrage avait pour premier objectif le soutien de la nappe phréatique (El Gouazine en Tunisie Centrale) a été équipé de piézographes automatiques afin de calibrer et valider un modèle hydrodynamique de recharge de la nappe (NASRI, 2002).

2.2 Discipline 2 : Géochimie des retenues

Pour étudier la qualité des eaux des lacs collinaires de Tunisie et modéliser les équilibres thermodynamiques des solutés dans les retenues, des échantillons d'eau de lac, de sols des bassins versants et de sédiments exondés des retenues ont été prélevés puis analysés. Des mesures physico-chimiques (O₂ dissous, température, pH, conductivité électrique) et des prélèvements d'eau pour l'analyse des ions majeurs et du phosphore ont été réalisés par campagnes trimestrielles. Ponctuellement, pour quelques lacs, la structure verticale de la colonne d'eau (transparence, conductivité, température, O₂ dissous) a été déterminée et des sédiments ont été prélevés au milieu du lac pour l'analyse des formes du phosphore. Vingt-quatre retenues ont été ciblées pour des prélèvements réguliers. Cinq retenues ont été choisies pour la modélisation des

équilibres thermodynamiques (modèle Espresso, RIEU *et al.*, 1997) et pour un travail sur les risques d'eutrophisation (RAHAINGOMANANA, 1998).

2.3 Discipline 3 : Hydro-pédologie des impluviums

Dans les bassins étudiés, la dynamique morpho-pédologique actuelle est influencée par la dureté des roches (érosion différentielle) et par le pendage des couches (pendage conforme ou inverse). L'altéro-pédogenèse, s'opérant en climat actuellement semi-aride à aride, est ralentie et donne la primeur aux processus de dynamique actuelle (dégradation hydraulique, alcalinisation, salinisation, etc.). L'érosion générale a également pu amener à l'affleurement des matériaux indurés : encroûtements calcaires, voire gypseux, reliques des pédogenèses passées. Pour ces raisons, il existe une nette dynamique structurale des surfaces susceptible de modifier le rapport infiltration / ruissellement et d'orienter les modalités de l'érosion.

Les sols à argiles gonflantes sont fortement représentés dans les bassins versants étudiés et la macro-porosité induite par les fentes de retrait en raison du climat sec est très importante. Un mois après les dernières pluies de printemps, des fentes de plusieurs millimètres de large et profondes jusqu'à un mètre s'ouvrent en réseau polygonale. Il faut environ 150 mm de pluie pour les refermer à l'automne. Les années les plus sèches, ce réseau de fentes s'ouvre entre les pluies d'automne et celles de printemps. Cette macro-porosité est encore plus forte dans les bassins gypseux.

Ces fissures constituent un réservoir hydrique temporaire jouant un rôle important dans le stockage des premières pluies de septembre ou d'octobre et dans les transferts de solutés vers la nappe ou latéralement vers le lac sans passer par le réseau hydrographique.

Dans ce contexte et suivant les problèmes dominants dans les sites pilotes les thématiques suivantes ont été développées :

- 1) Étude de l'érosion sur placette sous simulation de pluie et séparation des pertes en sol par érosion en nappe et érosion en ravine (HAMED *et al.*, 2002).
- 2) Fonctionnement des ravines et ravins, typologie (COLLINET et ZANTE, in HYDROMED 2001).
- 3) Rôle de la macro-porosité et des fentes de retrait dans les transferts d'eau et des solutés (OLSSON *et al.*, 2002, ÖHRSTRÖM *et al.*, 2002, PERSSON *et al.*, 2001).

2.4 Discipline 4 : Agro-climatologie

L'utilisation agricole de l'eau des lacs est un objectif important de la mise en place des lacs collinaires. En complément des études en hydrologie sur les bilans hydriques des lacs collinaires de Tunisie, une étude agro-climatique a été basée sur une analyse fréquentielle des déficits des cultures en relation avec leurs besoins en eau. Pour les besoins en eau des cultures, l'évapotranspiration de référence (ETO) a été calculée selon la méthode de Penman-Monteith en utilisant la formule proposée par la FAO (ALLEN *et al.*, 1998). La détermination des risques de sécheresse a été basée sur les valeurs des déficits hydriques des cultures, ces déficits étant calculés à partir d'un modèle agro-météorologique simple prenant en compte le rôle du réservoir en eau du sol et les différents stades de développement des cultures.

À l'échelle du bassin-versant, deux thématiques principales ont été développées : d'une part, l'étude de l'évapotranspiration d'une culture de blé et de tomate en conditions paysannes et d'autre part, l'étude de l'évapotranspiration de référence. Pour cela sur deux sites pilotes contrastés de Kamech (condi-

tions sub-humides mais fortement ventées) et d'El Gouazine (conditions semi-arides), des stations micro-météorologiques mesurant de façon précise et continue les composantes du bilan radiatif (rayonnement global et rayonnement net), le vent (vitesse et direction), les flux de conduction dans le sol (fluxmètre et températures à différentes profondeurs), les températures de plantes et les températures de l'air, la pression de vapeur d'eau au niveau de la culture et à 2 m (pour la détermination du flux de chaleur latente) ont été installées. Ces paramètres sont mesurés toutes les 15 secondes et leurs valeurs moyennes sont enregistrées sur un pas de temps de 30 minutes. Ils permettent le calcul des composantes du bilan énergétique, la détermination de la demande climatique et celle de l'évapotranspiration de la culture.

2.5 Discipline 5 : « Études sociales et économiques »

Des enquêtes au niveau des collectivités locales en Tunisie ont visé l'évaluation des impacts sociaux et économiques des lacs collinaires dans la dorsale tunisienne (SELMi, 1996). Un travail identique a été mené au niveau des villages (enquêtes douars) dans le Rif occidental marocain (MERZOUK et MELIATI ALAMI

pour établir la place exacte des petits barrages dans les politiques nationales d'aménagement hydraulique. Elles ont également abordé les aspects légaux et institutionnels liés à la réalisation et à la gestion de ces ouvrages (DROUBI et KHALIL in HYDROMED 2001).

3 - QUELQUES RÉSULTATS ET RÉALISATIONS

L'équipe de recherche multidisciplinaire a organisé ses activités en quatre ateliers thématiques permettant une approche intégrée pour analyser le fonctionnement du lac collinaire et ses impacts sur l'environnement et sur les sociétés.

3.1 Atelier 1 : État de l'art et choix de sites pilotes

Une revue bibliographique et documentaire sur les petits barrages a été réalisée, elle comprend : (i) une synthèse sur les barrages collinaires existants dans les pays du programme et leur place dans la mobilisation des ressources en eau (SELMi & NASRI, 1997 pour la Tunisie, KARA DAMOUR & MISKI, 1997 pour la Syrie, HYDROMED, 1997 pour le Liban et le Maroc) (ii) une analyse des modèles hydrologiques existants et pouvant être utilisés dans l'étude des bas-

sins versants semi-arides de barrage collinaire (RAGAB *et al.*, 1997), (iii) une bibliographie générale sur les aménagements de petite et moyenne hydraulique (HYDROMED, 1997).

Dans le cadre de cet « état de l'art », le programme HYDROMED a organisé un atelier international à l'Université de Lund en juin 1998 et a invité des scientifiques reconnus (BERNDTSSON, 1999).

Ces travaux ont pu montrer l'intérêt de la petite hydraulique dans la gestion des ressources naturelles en zone semi-aride. De nombreux référentiels techniques et économiques sont disponibles pour la réalisation de ces ouvrages. Leur mise en œuvre va d'initiatives privées (répandues dans les montagnes libanaises) à des programmes de développement très encadrés où l'état intervient à toutes les étapes (Syrie) ou en liaison avec des associations et/ou des opérateurs privés (Maroc, Tunisie). Un désengagement de l'état est en cours dans la majorité des projets étudiés, mais à des degrés très variables.

Les études d'impact aussi bien sur l'environnement que sur l'économie des sociétés riveraines sont rares et très ponctuelles. Il s'agit, en général, de rapports de grandes agences de développement.

À partir de ces travaux bibliographiques et en fonction de la composition des équipes de recherche, sept bassins versants ont été choisis et équipés pour être des observatoires à long terme du fonctionnement hydrologique des

était en cours. Ils sont distribués sur la dorsale depuis le Cap Bon jusqu'à la frontière algérienne et sont représentatifs du gradient pluviométrique de la zone semi-aride entre 500 mm (limite des bioclimats sub-humides et semi-arides méditerranéens) et 250 mm de précipitation inter-annuelle (bioclimat semi-aride continental). Les lacs collinaires de ces sites 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 (158 ha pour le bassin versant de Mrichet El Anze) à deux dizaines de km² (1810 ha pour le bassin versant d'El Gouazine) et la capacité des barrages de 40 000 à 250 000 m³. Les principaux types de sols méditerranéens y sont rencontrés : des sols limono-argileux à argiles actives sur marne (Kamech dans le Cap Bon) aux sols bruns développés sur calcaire (Mrichet El Anze) ou aux sols gypseux (Fidh Ali). On remarque d'importantes traces d'érosion sur tous les bassins mais la densité de ravinement et de glissement de terrain est variable. Les systèmes de cultures comprennent des céréalicultures, légumineuses, oliveraies, vignes et vergers ou maraîchage irrigué.

Au Maroc, le choix s'est porté sur l'équipement d'un seul site pilote : le barrage Saboun dans le Tangérois. Le barrage a été mis en service en 1991. Il a une capacité de 1,1 million de m³, une digue de 15 m de haut pour une longueur de 450 m. Sa profondeur moyenne est 3,56 m. Cette faible profondeur pour un ouvrage de cette importance, le rend sensible à l'évaporation. Le bassin versant a une superficie de 702 ha. Un périmètre irrigué d'une centaine d'hectare est équipé en aval de la digue. Le climat est sub-humide avec une pluviométrie inter-annuelle frisant les 700 mm. Les sols marneux sont très susceptibles à l'érosion, mais le modelé en collines douces du bassin montre peu de ravinement.

En Syrie, le site choisi se trouve sur le plateau ondulé et basaltique de Homs. Le bassin versant a une superficie de 359 ha. L'impluvium est bien aménagé avec des cordons et murets pierreux formant un bocage lithique. Cet aménagement réduit les problèmes d'envasement. En trente ans de service, le volume de vase ne correspond qu'à 6,5 % de sa capacité initiale. Le barrage a été construit en 1967. Il a une capacité de 445 000 m³. Le déversoir a été réaménagé pour les besoins de l'étude en cours. La digue a une hauteur de 13 m et 512 m de long. Au débordement, il a une profondeur moyenne de 4,16 m, ce qui protège bien les réserves contre l'évaporation. Un périmètre irrigué de 30 ha est situé en aval du barrage.

3.2 Atelier 2 : Eau – Sol – Environnement

Le tableau 1 récapitule les données acquises sur les 7 sites pilotes du programme. Une méthode de reconstitution des débits instantanés (pas de temps 5 minutes) entrant dans la retenue pendant les crues a été mise au point (ex.

Tableau 1 Données hydrologiques de bases disponibles par site pilote.**Table 1** *Hydrological data available for each trial site.*

N.B. Les dernières données publiées concernent l'année 2001-2002 mais les observations se poursuivent.

Site pilote	Pluviographie	Limnimétrie	Évaporation	Étalonnage du déversoir	Bathymétrie	Données géographiques
Kamech Tunisie	Mars 1994 à septembre 2002	Mars 1994 à septembre 2002	Août 1995 à septembre 2002	Oui	Juillet 1995 Juillet 1996 Avril 1998 Juillet 1999 Décembre 1999	MNT Occupation des sols Carte pédologique Carte géologique Parcellaire
EI Gouazine Tunisie	Octobre 1993 à septembre 2002	Juin 1993 à septembre 2002	Mai 1995 à septembre 2002	Oui	Juillet 1993 Juin 1996 Juin 1997 Mai 1998 Mai 2000	MNT Occupation des sols Carte pédologique Carte géologique
Mrichet Tunisie	Septembre 93 à septembre 2002	Septembre 93 à septembre 2002	Septembre 95 à septembre 2002	Oui	Février 1991 Mars 1995 Mai 1996 Mars 1998 Septembre 99	MNT Occupation des sols Carte pédologique Parcellaire
Fidh Ali Tunisie	Janvier 1993 à septembre 2002	Janvier 1993 à septembre 2002	Septembre 95 à septembre 2002	Oui	Juin 1993 Mai 1996 Juin 1997 Septembre 98 Septembre 99	MNT Occupation des sols Carte pédologique
Es Sénégal Tunisie	Octobre 1995 à septembre 2002	Novembre 93 à septembre 2002	Septembre 99 à septembre 2002	Oui	Mai 1995 Juin 1996 Juin 1998	MNT Occupation des sols
Saboun Maroc	Novembre 97 à septembre 2002	Novembre 97 à septembre 2002	Novembre 97 à septembre 2002	Oui	Septembre 99	MNT Occupation des sols Carte pédologique
Syndiané Syrie	Décembre 97 à septembre 2002	Janvier 1971 à septembre 2002	Janvier 1998 à septembre 2002	Oui	Décembre 1997 Septembre 1998 Septembre 2000	MNT

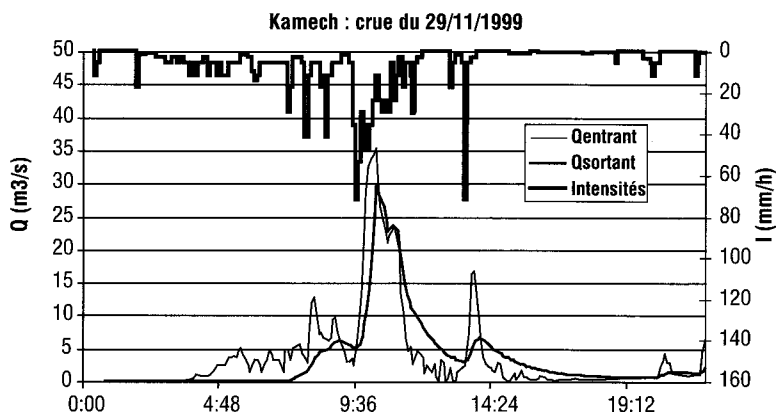


Figure 2 Reconstitution des débits entrant et sortant dans la retenue de Kamech.

Calculated discharge into and out of the Kamech reservoir.

Les données hydro-pluviométriques ont permis de construire un modèle de simulation de crue et de remplissage du réservoir. Ce modèle conceptuel intitulé HYDROMED est calibré à partir de l'optimisation de trois (ou quatre) paramètres. La méthode d'optimisation est basée sur l'algorithme génétique qui considère les chroniques de débits comme des « chroniques filles » des pluies

et les paramètres de calibration comme des gènes qui se croisent et subissent des mutations. Le modèle comprend deux modules : le premier permet la reconstitution des crues et la génération de chroniques de débits, le second permet le calcul des probabilités de défaillance en fonction du taux de prélèvement et des caractéristiques de la retenue. Il a été calibré et validé sur plusieurs sites pilotes. (RAGAB *et al.*, 2001, b).

Ce modèle a été utilisé pour simuler des crues entrant dans le réservoir, à partir de hyétoigrammes d'averses types dont la récurrence est connue. Un modèle de remplissage du réservoir et de propagation de la crue permet de reconstituer les débits évacués au déversoir (figure 3a) et les variations des hauteurs d'eau dans la retenue (figure 3b) en fonction de la cote du plan d'eau dans le barrage avant l'arrivée de la crue (ALBERGEL *et al.*, 1999). On remarque que la crue « type » de récurrence décennale survenant dans le lac, à la cote de déversement, conduirait à un très léger débordement sur la digue pour le bassin d'Es Senega (Tunisie) présenté en exemple. Il a une superficie de 363 ha, se trouve en climat semi-aride et le lac collinaire a un volume de 60 000 m³ (bathymétrie de 1998).

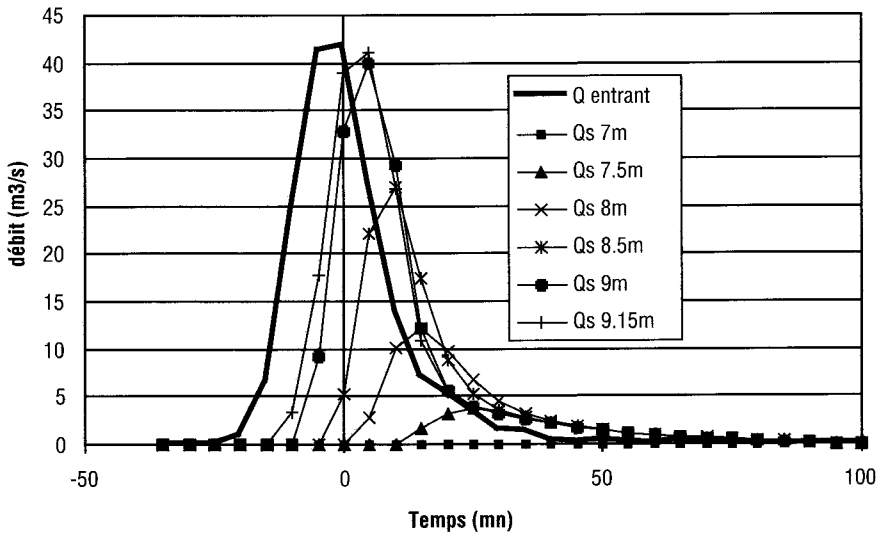


Figure 3a Lac collinaire de Es Sénéga (Tunisie), reconstitution des débits déversés pour une crue d'averse décennale. (Qs débit déversé, Xm cote du barrage à l'arrivée de la crue).

Es Senega hill reservoir (Tunisia) - simulated outflows for a ten-year flood (Qs outflow, xm water level in the dam before flooding).

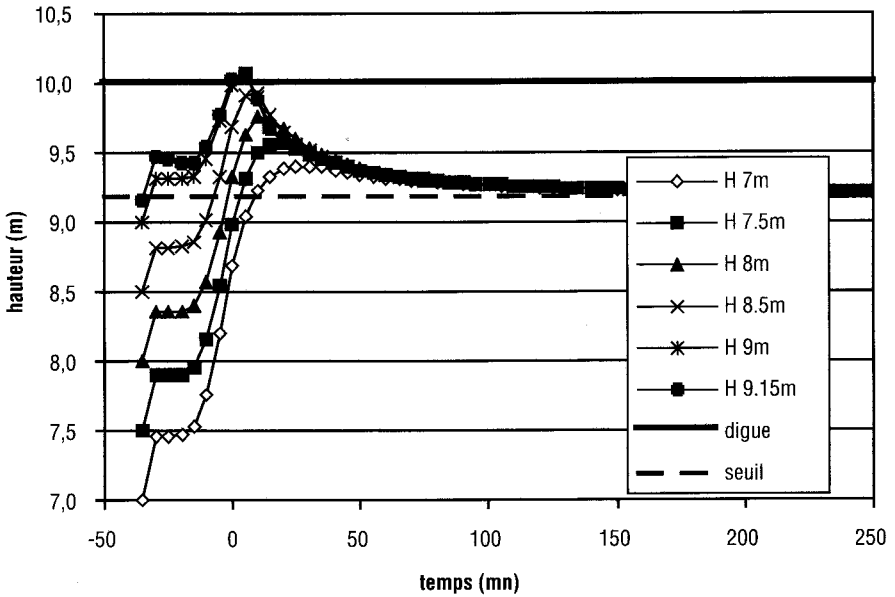


Figure 3b Lac collinaire de Es Sénéga (Tunisie), reconstitution des cotes du plan d'eau pour une crue d'averse décennale. (Xm cote du barrage à l'arrivée de la crue).

Es Senega hill reservoir (Tunisia) - simulated water levels for a ten-year flood (xm water level in the dam before floodin).

Les crues souvent violentes transportent une quantité importante de sédiments qui se déposent dans les retenues. Le tableau 2 récapitule les données d'envasement des 7 barrages pilotes (ALBERGEL *et al.*, 2003). Il montre que les érosions spécifiques sont très variables d'un bassin à l'autre. Elles varient de 1,1 m³/ha/an (soit 1,8 t/ha/an), sur un bassin de piémont bien aménagé en dispositifs anti-érosifs et assez boisé (El Gouazine en Tunisie), à 31 m³/ha/an (soit 50 t/ha/an) sur un petit bassin très marneux des collines pré-rifaines au Maroc. Le même suivi sur 24 petits barrages tunisiens montre une perte totale de volume de 585 200 m³ à la fin de l'année 1999 sur une capacité initiale de stockage de 2 634 000 m³, soit une perte de 22 % pour une durée d'existence moyenne de 7,7 années. La perte moyenne de la capacité de stockage est donc de 4,6 % par an (ordre de grandeur cité en Italie par GAZZALO & BASSI, 1969).

Tableau 2 Envasement et érosion sur les 7 sites pilotes du projet HYDROMED.

Table 2 *Siltation of reservoirs and watershed erosion for seven HYDROMED trial sites.*

Station	Surface du bassin ha	Année de création	Mois de la dernière mesure	Volume initial m ³	Sédiments stockés m ³	Espérance de vie des ouvrages années	Érosion du bassin m ³ /ha/an
Fidh Ali	413	1991	Sept. 99	134 710	49 843	22	15,1
M'Richet el Anse	158	1991	Sept. 99	42 400	9 609	35	7,6
El Gouazine	1810	1990	Mai 98	237 030	16 030	>100	1,1
Es Senega	363	1991	Juin 98	86 420	27 778	22	10,9
Kamech	246	1993	Déc. 99	142 100	29 441	29	20,0
Syndianeh	359	1967	Oct. 00	433 300	28 370	>100	2,4
Saboun	702	1991	Nov. 99	1 066 440	162 450	53	28,9

Pour mieux comprendre les problèmes de transport solide et d'envasement des retenues, une série de travaux ont été entrepris pour analyser et modéliser les processus d'érosion sur les versants. Les mesures d'érosion ravinatoire ont révélé, qu'en année à pluviométrie normale, la majorité des terres mobilisées sur le versant y restent (exportations inférieures à 5 t/ha/an) mais, qu'en année exceptionnellement humide, ces stocks des années précédentes et la production ravinatoire du moment se combinent pour donner des exportations voisines de 35 t/ha/an (COLLINET & ZANTE, *in* HYDROMED, 2001).

Les impacts des aménagements anti-érosifs ont été également étudiés. C'est ainsi que la rétention en terre des banquettes en courbe a été estimée à 6t/ha pour une année moyenne sur une jachère emblavée en céréale l'année précédente (COLLINET & ZANTE, *in* HYDROMED, 2001).

Parallèlement aux travaux sur les matières solides transportées, des études ont porté sur les matières dissoutes, la qualité des eaux et les risques d'eutrophisation des lacs. Trois groupes géochimiques ont été identifiés en période d'apports superficiels dans les retenues, correspondant aux géologies des bassins. (1) Les eaux sulfatées-calciques caractérisent les retenues situées sur des bassins aux sols marno-gypseux. Ces eaux sont les plus chargées en sels et l'augmentation de la salinité par évaporation peut limiter les usages pour

l'irrigation. (2) Les eaux à dominante bicarbonatée-calcique, surtout observées dans les sous-bassins versants calcaires, sont bien plus diluées et présentent moins de contraintes. (3) La retenue située au Cap Bon se singularise par des eaux peu chargées mais à dominante chlorurée-sodique. Du point de vue de la salinité, la conductivité des eaux suit celle de la diminution de volume des barrages. Avec des valeurs de SAR (Sodium Absorption Ratio $\text{Na}^+/\text{racine}(0.5(\text{Ca}^{++}+\text{Mg}^{++}))$) variant entre 0,3 et 3, les salinités mesurées satisfont généralement aux divers usages.

L'étude de la structure verticale des lacs montre l'existence de stratifications thermiques estivales dans les retenues les plus profondes et dans ce cas, d'une transparence réduite. Les teneurs en Chlorophylle sont souvent inférieures à $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, mais les macrophytes se développent dans les eaux limpidés.

Les eaux sont sous-saturées ou à l'équilibre par rapport à l'hydroxyapatite, mais la précipitation du phosphore dissous ajouté expérimentalement dans les eaux de Fidh Ali (Tunisie) semble dépendre de la formation du phosphate tricalcique amorphe. Le rôle des sédiments dans la régulation du phosphore a été étudié dans les retenues de Fidh Ali, M'Richet el Anze et Es Seghir (Tunisie). Les teneurs en phosphore total des sédiments analysés vont de 0,4 à $1,9 \text{ mg P}\cdot\text{g}^{-1}$ sec et la fraction P~CaCO₃ prédomine (250 à $800 \mu\text{g P}\cdot\text{g}^{-1}$ sec). La fraction P~FeOOH est globalement plus importante dans les sédiments les plus riches en FeOOH. La capacité d'adsorption des sédiments n'est toutefois pas directement liée à la quantité de FeOOH, elle pourrait dépendre du degré de cristallisation de ces composés (RAHAINGOMANANA, 1998).

3.3 Atelier 3 : Agronomie – Impacts des ménagements sur les sociétés riveraines

Les études entreprises sur les aménagements réalisés en Tunisie montrent que, sur le plan technique, la conception du lac collinaire est une réussite et qu'un nombre croissant d'ouvrages sont utilisés dans une perspective d'exploitation agricole.

Tableau 3 Réalisation et objectifs des lacs collinaires tunisiens. Évaluation de la situation d'exploitation.

Table 3 Objectives for the Tunisian hill reservoirs - evaluation of the management scheme.

Réalisation	Exploitation agricole	Protection des infrastructures	Recharge des nappes	Années	1997	1998	1999
Nombre de lacs	380	34	36	Nombre de lacs équipés	160	226	232
En %	84,4	7,6	8,0	Nombre de bénéficiaires	1115	1427	1405
du total				Comités de gestion	93	188	216
				Superficie exploitée (ha)	1402	1976	1845

(Ministère de l'agriculture, Direction de la CES, 1999)

sites pilotes (Tunisie, Maroc, Syrie), comprenant, différentes cartographies, les observations hydro-pédologiques, les enquêtes agronomiques, économiques et sociologiques, les résultats d'analyses chimiques et ceux de toutes les expérimentations réalisées. Au second niveau, sont collationnées les données d'un réseau de surveillance hydro-pluviométrique concernant trente barrages et leur bassin versant en Tunisie. Un annuaire de ces données est publié au mois d'avril (8 numéros ont paru, DCES, IRD, 1995, 96, 97, 98, 98, 2000 et 2001). Au troisième niveau, une base de données géoréférencées a été constituée sur 450 lacs construits en Tunisie entre 1988 et 2000. Elle contient un cer-

gestion (objectifs de l'aménagement, nombre de groupes motopompes) et l'usage de l'eau (organisation des cultivateurs et nombre d'hectares mis en valeur).

3.4.2 Analyse comparée des politiques d'aménagement

Au Liban, au Maroc, en Syrie et en Tunisie, une analyse comparée des politiques nationales en matière d'aménagement et de gestion des lacs et barrages collinaires a été réalisée (DROUBI & KHOURI, *in* HYDROMED 2001). Au delà des différences entre pays, cette analyse met en exergue la faible participation des paysans bénéficiaires aux choix des sites, aux phases de conception, de réalisation et même de gestion de ces petits aménagements dans les quatre pays (Liban, Maroc, Syrie et Tunisie). Elle souligne la nécessité d'associer étroitement puissance publique et collectivité locale concernée, à tous les niveaux et

ruissellement, d'envasement, des débits de pointe selon différentes formules hydrologiques testées. Le logiciel affiche les données hydrologiques du bassin versant connu le plus proche, choisi dans la bases de données (niveau 2, réseau hydrologique de surveillance).

3. Le **troisième module** s'intéresse à une évaluation du projet selon des critères qui permettent de tenir compte de l'impact de la retenue sur les populations concernées et de lui fixer un objectif. Cette évaluation se fait à deux niveaux par le traitement d'une enquête : (i) évaluation de la réponse du projet aux objectifs de conservation des eaux et des sols, (ii) évaluation de la réponse du projet aux objectifs de développement rural : participation des agriculteurs, réponse à une difficulté d'approvisionnement, possibilité de pratiquer l'irrigation et de trouver un débouché sur les marchés locaux, organisation des utilisateurs potentiels en association.

4 - CONCLUSIONS

HYDROMED est typiquement un projet de recherche pour le développement ayant travaillé dans quatre pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée : Liban, Maroc, Syrie et Tunisie avec le concours de chercheurs d'institutions européennes (France, Espagne, Royaume Uni, Suède) et des pays tiers méditerranéens. À partir d'une demande concrète sur l'aménagement des bassins versants et la gestion de l'eau, des recherches plus fondamentales ont été développées.

En sciences de l'eau et du sol, une recherche sur les processus de ruissellement, d'érosion et des échanges entre les eaux de surface et les nappes phréatiques a abouti à des résultats originaux, à des modèles de fonctionnement et à un système expert d'aide à la décision en matière d'implantation de lacs collinaires. Une banque de données hydrologiques a été constituée.

En sciences agronomiques, de nombreuses données ont été réunies sur les exploitations agricoles de ces petits bassins versants. L'accès à l'eau et la possibilité d'irriguer ont été étudiés sur le plan bio-climatologique et sur le plan agro-économique.

En sciences sociales et économiques, les problèmes d'usage d'une ressource nouvelle ont été étudiés, les nouvelles richesses qu'elle induit ont été évaluées. Les conflits pour le partage de cette ressource ont été appréhendés. Une revue sur les aspects législatifs de la gestion des eaux de ruissellement a été réalisée.

Ces milieux artificiels sont restés longtemps étrangers à la recherche académique, mais des équipes de plus en plus nombreuses s'y intéressent avec le développement de la recherche sur l'environnement (eutrophisation, pollution des retenues, etc.) et la mobilisation internationale sur le thème des ressources en eau.

REMERCIEMENTS

Le programme HYDROMED a été réalisé dans le cadre d'un contrat de recherche avec la Direction Générale de la Recherche de l'Union Européenne (OTD4-INCO-DC-GR1-1-ERBIC-19-CT-200004).

programme et ce numéro spécial de la Revue des Sciences de l'Eau ont fait l'objet d'une mesure d'accompagnement financée par la même institution européenne. Tous les chercheurs impliqués dans ce programme remercient Si Ameer Horchani, Secrétaire d'État auprès du Ministre de l'Agriculture, de l'Environnement et des Ressources Hydrauliques, chargé des ressources hydrauliques et de la pêche (République de Tunisie) qui a soutenu et conseillé leurs actions.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFEID, CFGB (1993). Petits barrages. Acte des Journées Nationales d'étude sur les Petits Barrages. CEMAGREF Ed. Bordeaux, 2-3 Fev 1993. 514p.
- ALBERGEL, J., Y. PÉPIN, S. NASRI, M. BOUFAROUA (2003). Érosion et transport solide dans des petits bassins versants : modélisation et gestion. Modélisation et gestion de l'érosion et du transport solide en zones arides et semi-arides. In *Proceedings of the Int. Seminar Rain water harvesting and management of small reservoirs in arid and semiarid areas*, R. Berndtsson Ed., Lund Institute of Technology, 29/6 au 3/7/98. Report 3222, LUND, Suede. pp. 45-58.

- R. BERNDTSSON, M. EL-NIAZY, M. BALAH (2002). Comparison between rainfall simulator erosion and observed sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment, pp. 1-16 *Catena*, Vol. 50. Elsevier.
- HYDROMED (1997). Second rapport d'avancement. *DG Recherche STD4 INCO DC contrat ERBIC 18 CT 960091*, ORSTOM Tunis, 101 p.
- HYDROMED (2001). Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen. *DG Recherche STD4 INCO DC contrat ERBIC 18 CT 960091* Albergel J and S. Nasri Ed. IRD, INRGREF Tunis 120 p + An.
- KARA DAMOUR S., A. F. MISKI (1997). Small dams and hill reservoirs in Syria. *DG Recherche STD4 INCO DC contrat ERBIC 18 CT 960091*. ACSAD. 67 p.
- NASRI, S (2002). Hydrological effects of water harvesting Techniques : a study of tabias, soil contour ridges, and hill reservoirs in Tunisia. *PhD thesis Department of Water Resources Engineering, Lund University*, n° 1030, pp 104.
- ÖHRSTRÖM, P., M. PERSSON, J. ALBERGEL, P. ZANTE, S. NASRI, R. BERNDTSSON, J. OLSSON (2002). Field-scale variation of preferential flow as indicated from dye coverage. *Journal of Hydrology* 257:164-173.
- OLSSON, J., M. PERSSON, J. ALBERGEL, R. BERNDTSSON, Z. P., P. ÖHRSTRÖM, S. NASRI. (2002). Multiscaling analysis and random cascade modeling of dye infiltration. *Water Resources Journal* 38:5.1 - 5.14.
- PERSSON, M., H. YASUDA, J. ALBERGEL, R. BERNDTSSON, P. ZANTE, S. NASRI, P. ÖHRSTRÖM. (2001). Modeling plot scale dye penetration by a diffusion limited aggregation (DLA) model, *Journal of Hydrology* 250:98-105.
- RAGAB R., B.N. AUSTIN, J. ALBERGEL (1997). Hydrology of semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs: an overview and some preliminary results from a Tunisian catchments.
- RAGAB, R., B. AUSTIN, D. MOIDINIS (2001, a). The HYDROMED model and its application to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs The rainfall-runoff model using a genetic algorithm for optimisation. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:543-553.
- RAGAB, R., B. AUSTIN, D. MOIDINIS (2001, c). The HYDROMED model and its applications to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. Reservoirs storage capacity and probability of failure model. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:563-568.
- RAGAB, R., D. MOIDINIS, J. ALBERGEL, J. KHOURI, A. DROUBI, S. NASRI. (2001, b). The HYDROMED model and its applications to semi-arid Mediterranean catchments with hill reservoirs. Rainfall - runoff model applications to three Mediterranean hill reservoirs. *Hydrology and Earth System Sciences* 5:554-562.
- RAHAINGOMANANA N. (1998). Caractérisation géochimique des lacs collinaires de la Tunisie semi-aride et régulation géochimique du phosphore. *Thèse de doctorat en Hydrologie, Université Montpellier I*, 311 p.
- RIEU M., R VAZ., F. CABRERA, F. MORENO 1997. Modeling the concentration or dilution of saline soil-water systems. *European Journal of Soil Science*, 49, 53-63.
- SELMI S. (1996). Interventions de l'état 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 doctorat en économie du Développement Agricole, Agro-alimentaire et Rural, ENSAM*. 342 p.
- SELMI S., M. B. SAI (1998). La gestion collective de l'eau d'irrigation en Tunisie : particularités des AIC des oasis. *In Sécheresse (Numéro spécial Oasis)* 1998, n° 9 (2), pp. 111-115.
- SELMI S., S. NASRI (1997). Synthèse préli-