

Impact des aménagements hydro-forestiers sur l'envasement des lacs collinaires en zone semi-aride tunisienne

Taoufik HERMASSI¹, Hamadi HABAIEB², Mohamed BOUFAROUA³ et Jean Marie LAMACHERE⁴

¹ Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, taoufikhermassi@yahoo.com

² Institut National Agronomique de Tunisie, habaieb.hamadi@yahoo.fr

³ International Center of Agriculture Research in the Dry Areas, mboufaroua@yahoo.fr

⁴ Institut de la Recherche pour le Développement, jean-marie.lamachere@ird.fr

RÉSUMÉ. – Depuis 1994, un réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne a été mis en place et suivi par la Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des terres Agricoles (DG ACTA) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) afin d'étudier les comportements hydrologiques et érosifs de petits bassins versants aménagés et non aménagés. 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. Ces petits bassins versants ont des superficies qui varient de 1,6 à 18 km². Ils sont représentatifs du gradient pluviométrique de la zone semi-aride variant de 250 à 600 mm de précipitation interannuelle.

Cette étude a permis de comprendre le fonctionnement global des bassins versants et d'en déduire les caractéristiques qui peuvent aider le développement au niveau de la gestion et la construction de ces ouvrages hydrauliques en tenant compte d'une connaissance sommaire du type des sols et des caractéristiques morphologiques et anthropiques des bassins versants. Le premier critère à prendre en compte est la topographie ou la pente moyenne du bassin versant. Le second critère est de nature lithologique, sous la forme d'un pourcentage de couverture en sol argileux du bassin versant. Les deux autres critères sont anthropiques, le premier étant le pourcentage de mise en culture des sols et le second est le pourcentage de la surface du bassin occupée par des aménagements de conservation des eaux et des sols ou par des forêts. Ainsi, avec la création d'un lac collinaire, lorsque la retenue sert à l'alimentation en eau d'un petit périmètre irrigué, il faudrait envisager une limitation de l'extension des aménagements anti-érosifs afin de permettre une alimentation en eau régulière de la retenue.

Mots-clés : ruissellement, érosion, envasement, lacs collinaires, aménagements hydro-forestiers, Tunisie

Impact of hydro-forest techniques on hill lakes siltation in Tunisian semi arid region

ABSTRACT. – Since 1994, a hill reservoirs hydrological monitoring pilot network has been established and monitored in the Tunisian Dorsal by the General Directorate of Agriculture Land Management and Conservation (DG/ACTA) and the Research Institute for Development (IRD). The aim of this network is to study the hydrological and erosion behaviour of small watersheds. These structures have very diverse impluviums from a semi-forest area to more or less anthropized to a landscape totally devoted to agricultural activities. These small watersheds with an areas range between 1.6 and 18 km² are the most representative for the semi-arid rainfall gradient ranging from 250 to 600 mm of interannual precipitation.

The basic purpose of this study was to understand the overall functioning of watersheds and to deduce the characteristics that could contribute to the development and management of these hydraulic structures, considering basic knowledge of soil type and morphological and anthropogenic characteristics of watersheds. The first criterion to consider is the topography or the average slope of the catchment. The second criterion is the lithology with the cover of marls and clays on the watershed. The two other criteria are anthropogenic: the first is the percentage of the area covered by cultivated soils and the second is the percentage of the area covered by anti-erosive techniques or forests. Thus, with the creation of hill reservoirs, for small irrigation water supply, a limitation in the expansion of anti-erosion techniques should be considered to ensure regular water supply from the reservoir.

Key-words: runoff, erosion, dam silting, hill lakes, hydro-forest techniques, Tunisia

I. INTRODUCTION

La Tunisie est caractérisée par un climat particulièrement capricieux et une pluviométrie très aléatoire. Ses ressources en eau renouvelables sont à la fois rares et mal réparties, tant dans l'espace que dans le temps. Cette irrégularité des apports en eaux superficielles ne permet de satisfaire les besoins en eaux domestiques et agricoles de la Tunisie que par l'exploitation des ressources en eaux souterraines et la construction

d'ouvrages hydrauliques. Il faut cependant tenir compte du faible taux de renouvellement des ressources en eaux souterraines et de l'envasement des retenues qui provoque une réduction progressive des capacités de stockage en eaux superficielles. Dans les pays aux climats aride et semi-aride, l'alluvionnement des retenues artificielles peut en effet atteindre des proportions considérables, en particulier lorsque les bassins versants qui alimentent ces retenues sont formés de reliefs montagneux, sévèrement dénudés dans de très nombreux des cas.

Face à cette situation, qui apparaît contraignante et alarmante, deux stratégies pour le développement des ressources en eau et la conservation des eaux et du sol de la Tunisie ont été élaborées au cours des vingt dernières années par le Ministère de l'Agriculture (1990-2001 et 2002-2011) [DG ACTA, 2009]. Ces deux stratégies se sont concentrées essentiellement sur le traitement des versants et la réalisation de petits ouvrages hydrauliques, en particulier la construction de 850 lacs collinaires [Hermassi *et al.*, 2011]. La création de ces lacs est un choix formulé par les décideurs pour assurer un surplus de ressources hydrauliques pouvant contribuer au développement local et régional de zones où le développement des autres activités économiques est très peu réalisable.

Afin de bien mener la réalisation de ces ouvrages hydrauliques, la connaissance des apports en eaux superficielles des différents bassins versants du pays est apparue nécessaire aux responsables chargés de la réalisation de ces aménagements. Or le ruissellement, générateur des ressources en eaux superficielles à partir des pluies, est conditionné par un ensemble de paramètres physiques du bassin versant tels que le relief, les propriétés hydrodynamiques des sols tels que la rugosité et la perméabilité superficielle, des paramètres biologiques tels que le couvert végétal et anthropiques tels que la mise en culture. Ces paramètres sont complexes, interdépendants et variables dans le temps et dans l'espace. Par ailleurs, l'érosion des sols, génératrice des apports solides dans les retenues artificielles, est un phénomène très ancien en Tunisie, ayant provoqué au fil des siècles l'envasement de l'estuaire de la Medjerda et l'abandon par les Romains du port d'Utique. Dans ce pays, la principale cause de l'érosion des sols est anthropique, avec la disparition progressive de la végétation naturelle au profit des cultures annuelles et la pratique récente d'une agriculture mécanisée extensive qui tend à accroître, depuis un demi-siècle, ce phénomène.

Comprendre le comportement hydrologique des petits bassins versants en fonction de leurs caractéristiques physiques et anthropiques constitue donc une étape fondamentale à l'estimation des apports liquides et solides au niveau des lacs collinaires. En effet, la durée de vie d'un lac collinaire dépend de sa capacité initiale de stockage, mais aussi de l'érosion des sols de son bassin versant et de l'érosion des berges des oueds qui drainent ce bassin. Si on prend en considération le volume stocké en évitant de tenir compte de la profondeur de la retenue, le comblement d'un réservoir de faible dimension par des sédiments, tel qu'un lac collinaire, ne dépend pratiquement pas de la forme ou de la surface de ce réservoir. Pour dimensionner la capacité de stockage d'un lac collinaire et définir sa durée de vie, il faut donc tenir compte uniquement des apports solides entrant dans sa retenue et par conséquent de la capacité à l'érosion de son bassin versant. Afin de réduire les apports solides entrant dans une retenue, il est possible de prévoir la réalisation d'aménagements anti-érosifs, mécaniques ou forestiers sur son bassin versant d'alimentation, mais il faut éviter que ces aménagements ne réduisent de manière trop radicale les apports liquides. A cette fin, nous présentons dans cet article une méthode permettant d'évaluer le ruissellement et l'érosion des sols des petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon. Cette méthode est établie à partir d'observations effectuées sur le réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne qui a été mis en place par la DG ACTA et l'IRD depuis le début des années 1990 [Lamachère *et al.*, 2006] et suivi par ces deux organismes pendant plus de 15 ans.

II. LES LACS COLLINAIRES

Les retenues de faibles dimensions telles que les lacs collinaires sont actuellement répandues partout dans le monde, elles sont inspirées d'aménagements précurseurs vieux de plusieurs millénaires. Dès le premier siècle après J.C., les Yéménites avaient construit un grand nombre de petits ouvrages dans les vallées et en avaient même creusé le long des pentes [Conac *et al.*, 1984]. Dans la région du Nordeste au Brésil, la construction des premières retenues collinaires remonte à 1830 mais ce n'est qu'à partir des décennies 1980-1990 qu'elles ont fait l'objet d'études scientifiques pluridisciplinaires approfondies [Dubreuil, 1985, Molle *et al.*, 1986 ; Leprun *et al.*, 1986 ; Cadier *et al.*, 1990 ; Cadier et Dubreuil, 1996]. En Europe, ces ouvrages sont très fréquents surtout en Italie et en France, leur principe de construction est né en Italie du Nord vers 1951 [Darves-Bornoz et Clement, 1969]. Au Maghreb, le développement de cette technique de contrôle des eaux et de protection des grandes infrastructures a été essentiellement inspiré par le succès de l'expérience italienne.

La construction des lacs collinaires en Tunisie concerne actuellement toute la zone semi-aride surtout dans sa partie montagneuse. Toutefois, les premières expériences, qui remontent à plus d'un siècle, ont été réalisées dans la région subhumide de Bizerte [El Amami, 1984]. Ce n'est qu'à la fin des années 1960 que cette technique était reprise de nouveau à l'occasion d'une opération d'aménagement du haut bassin de Merguellil. Après une assez longue période de mise au ralenti, c'est à la fin des années 1980 que l'on s'intéresse de nouveau à cette technique de collecte des eaux de surface en privilégiant encore les bassins versant de Merguellil et Zéroud. En effet, avant la décennie 1990, le nombre de lacs collinaires en Tunisie ne dépassait pas les 87 unités. C'est à partir de 1990, que cette opération « lacs collinaires » prend toute son ampleur et sa véritable signification [Selmi et Nasri, 1997].

II.1. Les lacs collinaires en Tunisie, choix stratégique

En Tunisie, les politiques agricoles ont toujours considéré les ressources hydrauliques comme un facteur déterminant du développement de l'agriculture. Ces politiques ont agi donc dans le cadre de stratégies et de plans directeurs de mobilisation des ressources hydrauliques ou dans le cadre de stratégies sectorielles du développement agricole. L'objectif principal est de limiter les risques de pénurie dus à une agriculture pluviale à caractère fragile, particulièrement pour la production des denrées de base [Albergel et Rejeb, 1997].

Les lacs collinaires, sujets de ce travail, sont des petits barrages en terre aménagés par l'homme. Ils se situent au niveau des dépressions entre les collines, ce qui permet la collecte des eaux de ruissellement. Leur implantation et leur promotion sont un choix stratégique intéressant permettant la mobilisation des ressources hydrauliques naturelles afin de répondre aux besoins en eau, sans cesse croissants, principalement pour l'agriculture [D CES/IRD, 2000].

Les lacs collinaires contiennent quelques dizaines à quelques centaines de milliers de m³ d'eau recueillis sur des bassins versants d'une superficie de quelques dizaines d'hectares à quelques km² et sont situés dans des régions de pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 250 mm. Les ressources en eau mobilisables par les lacs collinaires (850 unités) sont de l'ordre de 135 millions de m³.

Les lacs collinaires sont aptes à réguler les flux hydriques. Ils sont donc susceptibles de maintenir les populations en place en leur assurant de réelles possibilités de développement agricole. Leur durée de vie et leur efficacité dépendent cependant de la qualité du choix du site d'implantation et des aménagements réalisés dans le bassin versant car l'utilisation des eaux d'un lac collinaire dépend tout d'abord du remplissage de la retenue par le ruissellement sur son bassin versant, mais aussi de l'érosion des sols qui contribue à réduire la capacité de stockage de la retenue au fil des ans. Pour choisir la capacité initiale d'une retenue artificielle, il faut donc tenir compte à la fois de la capacité au ruissellement du bassin versant mais aussi de sa capacité à l'érosion afin de dimensionner la retenue en fonction de l'importance des apports liquides et solides au lac collinaire.

II.2. Le réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires

Depuis 1994, un réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne a été mis en place et suivi par la DG ACTA et l'IRD (Figure 1) afin d'étudier les comportements hydrologiques et érosifs de petits bassins versants aménagés et non aménagés. Ce réseau appartient en grande partie à la Dorsale tunisienne caractérisée par un climat semi-aride.

De point de vue climatologique, la zone étudiée est caractérisée par des pluies peu abondantes et rares, parfois orageuses et brutales, réparties très irrégulièrement dans l'espace et dans le temps. Ces pluies sont liées à une humidité relativement faible en été, assez élevée en hiver. Les températures

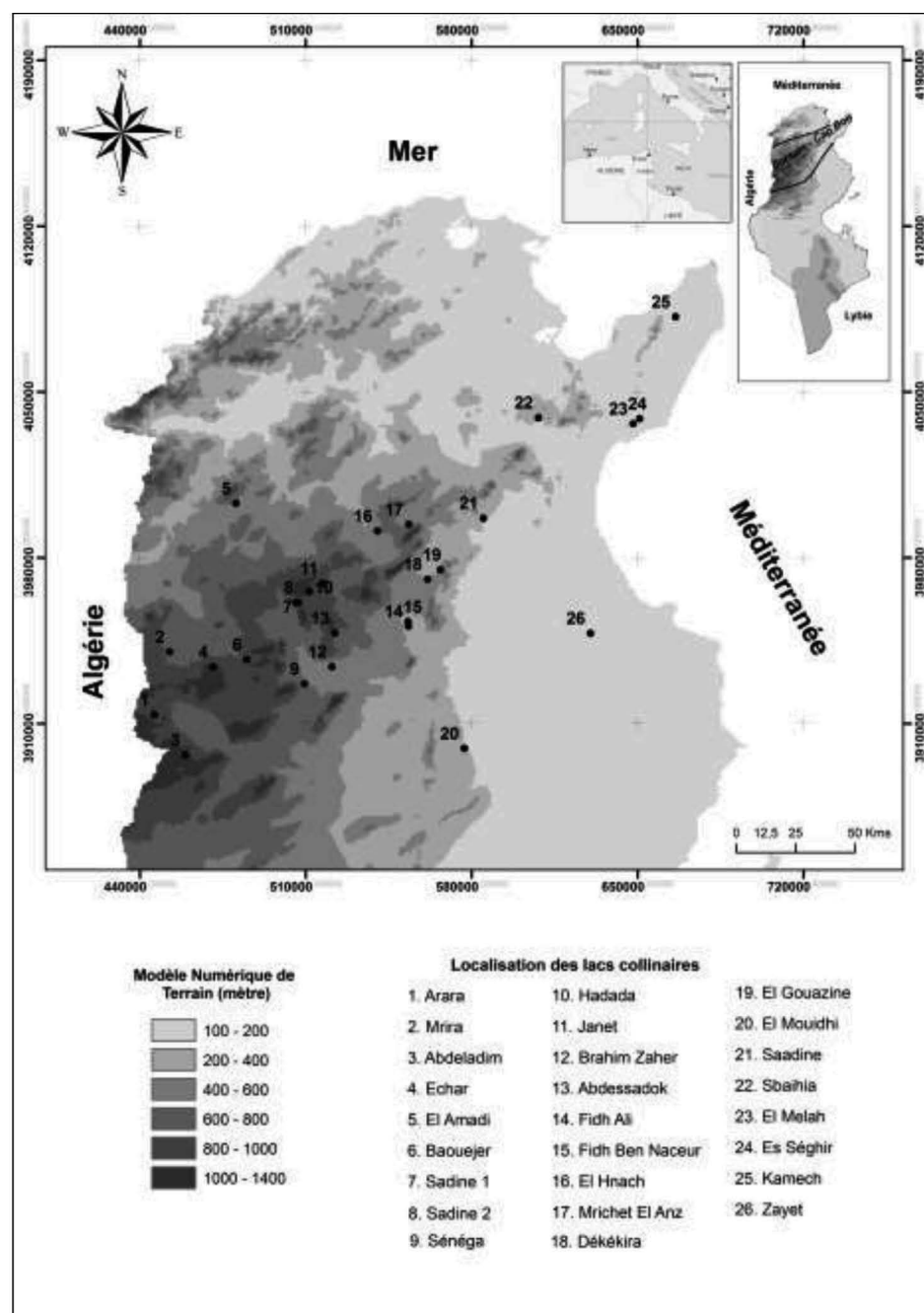


Figure 1 : Localisation des lacs collinaires du réseau pilote de surveillance (DG ACTA-IRD, 2001).

sont fortement continentales aux grandes amplitudes diurne et annuelle (18 à 20 °C), [Hermassi, 2000]. C'est une région faite d'une succession de massifs montagneux constitués essentiellement de matériaux calcaires formant la Dorsale tunisienne. Cette région est couverte en partie d'une forêt à base de Pin d'Alep. Elle est fortement anthropisée et sa couverture végétale naturelle n'occupe qu'environ 30 % de sa superficie.

Dans la Dorsale tunisienne, les aménagements de Conservation des Eaux et du Sol (CES) les plus répandus sont les banquettes à rétention totale ou partielle. Ces ouvrages jouent un rôle important de stockage des eaux de ruissellement sur les versants. Par conséquent, ils limitent les transports solides à l'échelle des petits bassins versants. Les reboisements sont eux aussi parfaitement bien identifiés et jouent un rôle important, réduisant considérablement le ruissellement et l'érosion lorsque la végétation est dense.

En ce qui concerne les travaux agricoles, la mise en culture joue un rôle fondamental sur l'érosion et le ruissellement des sols de la Dorsale tunisienne. A l'échelle de la parcelle, l'impact des travaux culturaux sur le ruissellement et l'érosion des sols a été particulièrement étudié en Tunisie par Cormary et Masson [1964] puis Masson [1971], aux Etats-Unis par Wischmeier et Smith [1978], en Afrique de l'Ouest par Roose [1977] et en Guyane française par Fritsch [1992]. Ces recherches ont abordé en particulier les processus de ruissellement et d'érosion en relation avec les régimes pluviométriques, les itinéraires culturaux et les aménagements hydro-agricoles, ainsi que l'évaluation des bilans hydro-sédimentaires en fonction de la variabilité spatiale et temporelle de l'occupation du sol. Cet impact est variable au cours du temps car les labours, surtout s'ils suivent les courbes de niveau, limitent considérablement le ruissellement. Par contre, dès que les semis de céréales ont été effectués, généralement entre la mi-novembre et la mi-décembre au Nord de la Tunisie, les sols deviennent très vulnérables à l'érosion hydrique en raison de l'absence de micro-relief et de couvert végétal. Cette forte vulnérabilité à l'érosion persiste généralement jusqu'au début du mois de mars, quand le taux de recouvrement végétal devient suffisant pour protéger efficacement les sols de l'érosion.

Les données utilisées dans ce travail sont issues des observations effectuées sur le réseau pilote de surveillance des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon. Les lacs collinaires sont numérotés selon leurs situations géographiques du Sud Ouest de la Dorsale vers le Nord Est (côté Cap Bon). Afin d'étudier les comportements hydrologiques et érosifs de petits bassins versants montagneux sensibles à l'érosion, ce réseau (figure 1) a été suivi sur une période de 16 ans (1994-2010) [D CES-ORSTOM 1995, 1996, 1997 ; D CES-IRD 1999, 2000 ; DG ACTA-IRD 2001-2002-2006-2007]. Suite à l'envasement de certaines retenues ou au dysfonctionnement des équipements hydro-métriques, les observations ont été arrêtées au niveau d'un certain nombre de lacs collinaires après plusieurs années de surveillance.

Les différentes caractéristiques physiques et morphologiques des lacs collinaires du réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne sont présentées dans le tableau 1.

III. MÉTHODOLOGIE ET MODÉLISATION GLOBALE

L'objectif de cet article est de développer une méthode permettant d'évaluer le ruissellement et l'érosion des sols

des petits bassins versants de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon à partir des informations collectées par la DG ACTA et l'IRD sur le réseau pilote des lacs collinaires et d'une connaissance des caractéristiques physiques et anthropiques des bassins versants basée sur l'utilisation de documents cartographiques (topographie et géologie), photographiques (occupation des sols et aménagements anti-érosifs en banquettes ou forêts).

III. 1. Les observations hydrométriques et bathymétriques sur le réseau pilote

Chaque lac collinaire du réseau pilote de surveillance hydrologique a été équipé d'une batterie d'échelles limnimétriques, d'un limnigraphe muni d'une sonde mesurant le niveau du lac, d'un pluviographe à augets basculeurs, d'un bac d'évaporation et d'un pluviomètre, ces deux derniers appareils étant relevés par des observateurs de la DG ACTA. Des centrales électroniques ont permis d'enregistrer cotes et hauteurs à la seconde près. Les évacuateurs de crues ont été aménagés avec des seuils déversant afin d'améliorer la précision des relations entre cotes observées et débits évacués par les déversoirs. Des tournées semestrielles sont organisées par la DG ACTA et l'IRD pour collecter les enregistrements et récupérer les carnets des observateurs.

La bathymétrie des lacs a été effectuée périodiquement mais pas systématiquement. Les mesures de profondeur des plans d'eau ont été réalisées par sondages des retenues à l'aide d'une mire graduée ou d'un décimètre lesté pour les profondeurs supérieures à 4 m. Pour obtenir un bon repérage des lignes transversales de bathymétrie et afin de prolonger par des nivellements topographiques les lignes transversales au-dessus du plan d'eau le jour du nivellement, les relevés bathymétriques ont été complétés par des nivellements au théodolite laser [Boufaroua *et al.*, 2006].

III.2. Relations entre les lames ruisselées et les pluies annuelles

Le coefficient de ruissellement (K_r) est le rapport entre la lame ruisselée annuelle considérée et la hauteur pluviométrique annuelle. Les valeurs utilisées sont des moyennes des coefficients de ruissellement annuels sur les périodes d'observations. Ce coefficient est fortement influencé par l'imperméabilisation des surfaces après les labours, en relation avec l'occurrence des fortes pluies et leur fréquence, mais aussi par la pente, la nature du sous-sol, la nature du couvert végétal et le cloisonnement des surfaces de ruissellement (banquettes, haies, murs, remblais). La végétation joue un rôle important puisque la présence de la végétation augmente la porosité et la rugosité des sols.

Pour mettre en relation les lames ruisselées entrant dans les lacs collinaires et les pluies annuelles tombées sur les bassins versants, nous avons supposé que cette relation est linéaire, de la forme :

$$L_r = A \cdot (P - P_0)$$

où L_r est la lame d'eau ruisselée annuellement sur le bassin versant, A est un coefficient de croissance de la lame ruisselée en fonction de la pluie, P est la pluie annuelle tombée sur le bassin versant et P_0 un paramètre de position que l'on peut assimiler à une pluie annuelle limite du ruissellement.

Dans cette relation, A exprime l'aptitude annuelle moyenne des sols au ruissellement et P_0 l'aptitude du bassin

Tableau 1 : Caractéristiques physiques des bassins versants du réseau pilote de surveillance hydrologique des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon.

N° d'ordre figure 1	Nom	An. Const.	S (ha)	Pr (km)	Kc	Ig (m/km)	Cap.Ini. (m³)	Observations pluvio-hydrométriques	
								Début	Fin
1	Arara	1993	708	13,85	1,46	78	91 150	19/11/1993	01/09/2002
2	M'Rira	1991	613	12,3	1,39	35	126 350	16/04/1993	En cours
3	Abdeladim	1992	642	11,57	1,28	45	164 080	18/11/1993	En cours
4	Echar	1993	917	15,5	1,43	35	186 840	09/11/1993	01/09/1999
5	El Amadi	1992	328	7,8	1,12	93	200 000	27/08/1999	01/09/2004
6	Baouejjer	1991	486	10,5	1,33	32	66 030	15/05/1993	01/09/2000
7	Sadine 1	1988	384	9,7	1,39	106	34 380	07/02/1992	05/04/2000
8	Sadine 2	1990	653	16,8	1,84	59	82 400	11/11/1992	01/09/2000
9	Es Sénégal	1991	363	8,47	1,25	87	86 420	10/11/1993	01/09/2002
10	Hadada	1992	469	9,9	1,28	94	84 970	22/09/1993	En cours
11	Janet	1992	521	12,25	1,59	67	95 570	23/09/1993	01/10/2003
12	Brahim Zaher	1992	464,4	12,8	1,66	80	86 540	24/03/1994	29/09/1999
13	Abdessadock	1990	307	7,95	1,25	128	92 530	14/10/1993	07/12/2000
14	Fidh Ali	1991	412,5	8,6	1,19	38	134 710	27/01/1993	01/10/2004
15	Fidh Ben Naceur	1990	169	5,75	1,24	55	47 110	27/01/1993	20/09/2001
16	El H'Nach	1992	395	9,55	1,35	104	77 220	13/10/1993	En cours
17	M'Richet El Anz	1991	158	5,5	1,23	72	41 780	21/09/1993	01/10/2003
18	Dékikira	1991	307	7,65	1,22	37	219 100	26/10/1993	En cours
19	El Gouazine	1990	1810	25,85	1,70	18	233 370	12/10/1993	En cours
20	El Moudhi	1991	266	7,7	1,32	43	142 770	21/04/1994	20/04/2009
21	Saadine	1992	272	8,28	1,40	93	35 620	25/01/1994	10/03/1999
22	Sbaihia	1993	324	7,37	1,15	77	135 100	15/12/1993	En cours
23	El Melah	1991	85	4,125	1,25	36	19 875	27/01/1994	02/09/1999
24	Es Séghir	1992	309	7,2	1,15	41	192 450	26/01/1994	01/04/2004
25	Kamech	1993	245,5	7,25	1,30	40	142 560	09/03/1994	En cours
26	Zayet	1993	650	11,5	1,26	9	145 480	03/09/1999	24/12/2006

Légende : An. Const. : Année de construction, S : Surface du bassin versant ; Pr : Périmètre ; Kc : Coefficient de compacité de Gravelius ; Ig : Indice globale de pente ; Cap. Ini : Capacité Initiale.

versant à la rétention, soit en raison d'une aptitude particulière des sols au stockage (fentes de retrait, labours, végétation) soit en raison d'un aménagement anti-érosif permettant de stocker les ruissellements superficiels (banquettes, réservoirs superficiels...) [Estrada Avalos *et al.*, 2004 ; Boufaroua *et al.*, 2006].

La figure 2 représente un exemple d'illustration de la relation entre les lames ruisselées et les pluies annuelles au niveau du bassin versant de Sbaihia (a) et Kamech (b).

Le bassin versant de Sbaihia (n° 22 – tab. 1) est représentatif des bassins versant aménagés en banquettes anti-érosives, avec un relief assez fort, une bonne compacité, des sols argileux gonflants, cultivés sur environ 50 % de la superficie du bassin. Il est également caractérisé par un fort couvert végétal forestier au sommet des versants sur environ 40 % de sa superficie [Lamachère *et al.*, 2006]. Il présente des sols à forte capacité de stockage en début de saison des pluies mais à forte capacité de ruissellement lorsqu'ils

sont très humectés. Ses paramètres de ruissellement annuel ($K_r = 6\%$; $A = 13\%$; $P_0 = 250$ mm) sont à comparer avec ceux du bassin versant de Kamech (n° 25 – Tab. 1), représentatif des bassins non aménagés et cultivés sur le même type de sols sur plus de 80 % de sa superficie [Lamachère *et al.*, 2006] ($K_r = 21\%$; $A = 50\%$; $P_0 = 380$ mm). On peut ainsi constater que l'aménagement du bassin versant de Sbaihia a divisé par un facteur supérieur à 3 (3,5 pour K_r ; 3,8 pour A) la capacité du bassin versant au ruissellement. Par contre, on peut également constater que l'aménagement du bassin n'a pas augmenté sa capacité de rétention, celle-ci étant fortement influencée, sur les sols argileux gonflants, par les labours de début de saison des pluies.

Le tableau 2 récapitule les paramètres caractéristiques du fonctionnement hydrologique des différents bassins versants du réseau des lacs collinaires. Des valeurs faibles du coefficient A exprime la faible aptitude des sols au ruissellement et qui correspond à des bassins versants caractérisés par des

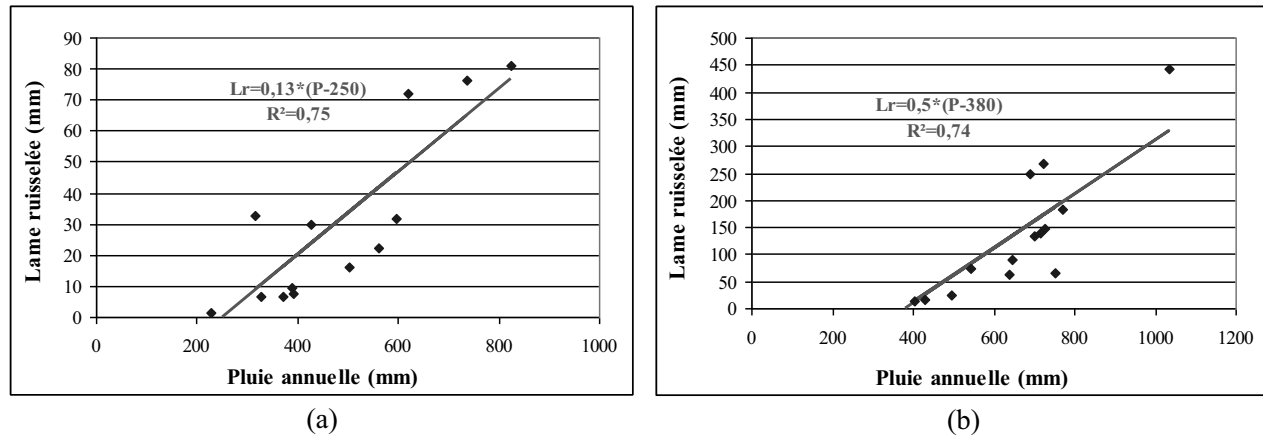


Figure 2 : Lames ruisselées en fonction des pluies annuelles au niveau des bassins versants de Sbahia (a) et Kamech (b).

Tableau 2 : Caractéristiques du fonctionnement hydrologique des bassins versants du réseau pilote des lacs collinaires.

	Pluie annuelle (mm)	Lame ruisselée annuelle (mm)	Kr annuel (%)	P0 (mm)	A (%)	N° d'ordre figure 1
Classe I	Ruissellement faible		≤ 5 %		< 10 %	
Abdeladim	295,3	15,6	5 %	100	9 %	3
Baouejjer	392,2	6,7	2 %	250	5 %	6
Echar	408,4	18,5	5 %	260	9 %	4
El Gouazine	451,0	18,9	4 %	100-240	7 %-4 %	19
El Melah	511,4	26,5	5 %	180	8 %	23
Es Séghir	535,3	15,3	3 %	220	5 %	24
M'Richet El Anz	472,6	13,3	3 %	250	6 %	17
Zayet	256,0	5,0	2 %	150	4 %	26
Classe II	Ruissellement moyen		5 à 11 %		< 20 %	
Abdessadok	374,8	20,5	5 %	270	15 %	13
Brahim Zaher	286,8	28,7	10 %	130	18 %	12
Es Sénégal	302,1	24,4	8 %	180	17 %	9
Fidh Ali	347,8	25,0	7 %	160	15 %	14
Hadada	491,0	53,8	11 %	180	15 %	10
M'Rira	429,1	45,4	11 %	100	12 %	2
Sadine 1	497,3	33,8	7 %	200	7 %	7
Sbahia	483,8	28,1	6 %	250	13 %	22
Classe III	Ruissellement fort				≥ 20 %	
Arara	299,0	50,0	17 %	200	45 %	1
Dékikira	392,7	42,8	11 %	200	22 %	18
El Amadi	633,5	112,1	18 %	350	20 %	5
El H'Nach	439,0	60,7	14 %	200	25 %	16
El Moudhi	272,9	27,2	10 %	140	20 %	20
Fidh Ben Naceur	312,4	22,3	7 %	230	20 %	15
Janet	497,2	66,2	13 %	200	22 %	11
Kamech	662,4	136,5	21 %	380	50 %	26
Saadine	411,5	76,5	19 %	250	45 %	21
Sadine 2	486,4	75,3	15 %	250	30 %	8

pententes faibles et des sols filtrants ou sur des versants très aménagés. Une forte valeur de P_0 correspond à une grande aptitude du bassin versant à la rétention et au stockage des ruissellements superficiels par la présence des fentes de retraits ou par le labour ou par une bonne couverture végétale.

Après plus de quinze ans de suivi hydrologique de ces retenues, on peut avancer quelques conclusions sur le fonctionnement hydrologique de leurs bassins versants afin d'améliorer les possibilités d'utilisation de l'eau des lacs collinaires pour l'irrigation et de choisir les caractéristiques des retenues en relation avec la capacité des bassins versants au ruissellement. L'analyse hydrologique à l'échelle annuelle montre que ces bassins versants ont des coefficients de ruissellement annuels moyens compris entre 2 et 21 % avec une valeur médiane de 8 %. Le croisement des classifications selon la pente, la lithologie, la mise en culture et l'aménagement du bassin versant avec celle du coefficient de ruissellement du bassin versant montre que :

- la classe 1 correspond à des bassins versants caractérisés par une pente moyenne à faible et des sols filtrants sur des versants qui peuvent être très aménagés (Es Séghir, El Gouazine, Abdeladim).

- la classe 2 correspond à des bassins versants caractérisés par des pentes fortes à moyennes et des sols argileux ou marneux sur plus de 50 % de la superficie du bassin. A l'exception des bassins versants de Sbailia et de Brahim Zaher, ils sont peu aménagés en banquettes anti-érosives et peu couverts par la forêt.

- la classe 3 correspond à des bassins versants caractérisés par des pentes fortes à moyennes et des sols argileux ou marneux sur plus de 75 % de la superficie du bassin. Ils ne sont pas aménagés en banquettes anti-érosives. A l'exception des bassins d'Arara (n° 1 – Tab. 1) et de Dékikira (n° 18 – Tab. 1), ils ne sont pas couverts par des forêts.

Le cas du bassin versant d'El Gouazine (n° 19 – Tab. 1) constitue un bon exemple de forte réduction de l'alimentation en eau d'une retenue par l'aménagement du bassin versant. Après l'aménagement en banquettes à rétention totale, sur environ 45 % de la superficie de son bassin versant au cours des années 1996 et 1997, l'alimentation en eau du lac collinaire d'El Gouazine a été réduite de manière radicale [Nasri, 2002]. La capacité annuelle de rétention du bassin versant est passée de 100 à 240 mm, ce qui correspond à un accroissement du volume de rétention du bassin versant dix fois supérieur au volume initial de stockage de la retenue. Le coefficient de ruissellement des fortes crues a été divisé par 3.

III.3. Fonctionnement sédimentaire des lacs collinaires

Nous avons reporté au tableau 3 les volumes de vase accumulés en 10 ans dans les lacs collinaires du réseau pilote de surveillance de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon et nous avons estimé ce même volume après 25 ans de fonctionnement en adoptant le même taux d'envasement moyen annuel sur la période d'observation qui est supposé représentatif sur une plus longue durée. Les mesures d'envasement permettent aussi de calculer la durée de vie de ces ouvrages ainsi que la vitesse de comblement des retenues (tableau 3).

En supposant que le régime hydrologique au cours de la période observée est représentatif d'une plus longue période, les lacs collinaires ont des durées de vie moyennes de 50 ans, avec une valeur minimale de 8 ans et une valeur maximale de 98 ans. La vitesse de sédimentation rapportée à la superficie du bassin versant, est aussi une caractéristique moyenne du comportement à l'érosion des bassins

versants, la valeur moyenne est de l'ordre de 8,4 m³/ha/an (0,6 – 17,5).

Après 10 ans de fonctionnement, 20 % des lacs collinaires sont totalement envasés, 30 % des lacs collinaires ont perdu plus de 40 % de leurs capacités de stockage, le reste des lacs ayant une capacité supérieure à 75 % de la capacité initiale. Après 25 ans de fonctionnement, seulement 20 % des lacs collinaires auront une capacité de stockage supérieure à 50 % de leur capacité initiale et 40 % des lacs collinaires seront totalement envasés. La figure 3 représente la classification des lacs collinaires selon les caractéristiques hydrologiques et sédimentaires. Elle fait ressortir clairement la relation entre le ruissellement fort et les fortes valeurs des taux d'érosion au niveau des bassins versants.

Les bassins versants ayant une érosion très forte (classe D), supérieure à 15 m³/an/ha, sont des bassins à pente moyenne à forte, avec des sols dominés par des marnes ou des argiles, cultivés à plus de 50 %, non aménagés en banquettes et sans couvert forestier. Les bassins versants ayant une érosion moyenne à forte (classe C), comprise entre 8 et 15 m³/ha/an, sont des bassins versants à pente forte à moyenne, avec des sols marneux ou argileux, peu aménagés ou aménagés sur des fortes pentes où les aménagements perdent beaucoup de leur efficacité (Sbailia, Arara). Les bassins versants où l'érosion est moyenne à faible, comprise entre 2 et 8 m³/ha/an, sont des bassins versants à pente moyenne à forte, où les roches calcaires peuvent occuper une superficie importante (30 à 70 %). Les bassins versants où l'érosion est très faible, inférieure à 2 m³/ha/an, sont des bassins très aménagés, à pente moyenne à faible, de forme allongée, sur lesquels la couverture lithologique comporte une part notable de roches dures.

Les bassins versants à ruissellement fort, caractérisés par des pentes fortes à moyennes et des sols argileux ou marneux, sont les plus érodés et ayant des retenues à durée de vie ne dépassant pas les vingt années. Alors que pour les bassins versants à faible ruissellement, caractérisés par des pentes faibles et des versants bien aménagés, les taux d'envasement sont plus faibles et la durée de vie des retenues est plus longue (supérieure à cinquante ans).

En ce qui concerne les travaux agricoles, la mise en culture joue un rôle fondamental sur l'érosion et le ruissellement des sols de la Dorsale tunisienne. Ce rôle est variable au cours du temps car les labours d'automne, surtout s'ils suivent les courbes de niveau, limitent considérablement le ruissellement tant que le cumul des pluies après labour ne dépasse pas 100 mm. Par contre, dès que les semis de céréales ont été effectués, généralement entre la mi-novembre et la mi-décembre, les sols deviennent très vulnérables à l'érosion hydrique en raison de l'absence de micro-relief et de couvert végétal. Cette vulnérabilité perdure jusqu'à la mi-mars, date à laquelle le couvert végétal commence à bien recouvrir la surface du sol, surtout au Nord Est de la Dorsale Tunisienne. Cependant, au niveau de la partie Sud de la Dorsale, les couvertures végétales varient beaucoup d'une année à l'autre et la protection des sols par la végétation cultivée est nettement plus réduite, surtout lors des gros orages d'automne.

Le cas du bassin versant de Kamech constitue un bon exemple de sous dimensionnement d'une retenue par rapport à la capacité de ruissellement du bassin versant, sa capacité de stockage étant plus de 2 fois inférieure au volume annuel moyen ruisselé sur le bassin versant. Un accroissement du volume de stockage de ce lac collinaire aurait permis un accroissement des périmètres irrigués implantés en aval de la retenue et un allongement de sa durée de vie. Si on examine la durée de vie des lacs collinaires, on s'aperçoit cependant

Tableau 3 : Caractéristiques du fonctionnement sédimentaire du réseau des lacs collinaires.

Nom	Volume initial de stockage (m ³)	Volume de vase en 10 ans (m ³)	Volume de vase en 25 ans (m ³)	Durée de vie (années)	Erosion du bassin versant (m ³ /ha/an)	N° d'ordre figure 1
Classe A	Erosion faible à très faible				< 2	
Echar	186 840	13 250	33 125	56	1,4	4
El Gouazine	233 370	17 724	44 309	93	1	19
Es Séghir	192 450	5 670	14 175	97	1,8	24
Classe B	Erosion faible à moyenne				2 à 8	
Abdeladim	164 080	42 671	106 679	29	6,6	3
Baouejer	66 030	14 900	37 250	31	3,1	6
Brahim Zaher	86 540	31 483	78 708	16	6,8	12
El Amadi	200 000	18 160	45 400	98	5,5	5
El Melah	19 875	5 373	13 433	33	6,3	23
El Moudhi	142 770	17 744	44 359	88	6,7	20
Hadada	84 970	29 700	74 250	31	6,3	10
M'Rira	126 350	22 759	56 898	89	3,7	2
Zayet	145 480	19 385	48 462	98	3	26
Classe C	Erosion moyenne à forte				8 à 14,9	
Abdessadock	92 530	32 450	81 125	23	10,6	13
Arara	91 150	58 940	58 940	8	8,3	1
El H'Nach	77 220	50 740	65 962	20	12,8	16
Es Sénégal	86 420	41 878	58 629	29	11,5	9
Fidh Ben Naceur	47 110	16 356	40 889	26	9,7	15
Kamech	142 560	30 995	77 488	69	12,7	25
M'Richet El Anz	41 780	15 781	39 453	24	10	17
Saadine	35 620	27 610	27 610	8	10,2	21
Sadine 1	34 380	41 085	41 085	16	10,7	7
Sbahia	135 100	33 769	84 423	52	10,4	22
Classe D	Erosion très forte				≥ 15	
Dékikira	219 100	53 644	134 109	65	17,5	18
Fidh Ali	134 710	62 304	49 843	17	15,1	14
Janet	95 570	77 970	77 970	12	15	11
Sadine 2	82 400	106 585	106 585	10	16,3	8

que le sous-dimensionnement des retenues est dû principalement à la sous-estimation de leur vitesse d'envasement à cause des formules empiriques utilisées et engendrant ainsi de grandes erreurs. Pour accroître la durée de vie des lacs collinaires tunisiens, il semble donc indispensable d'améliorer la prise en compte des capacités à l'érosion de leurs bassins versants en augmentant, dans la mesure du possible, la capacité initiale de stockage des retenues en fonction de l'importance de l'érosion.

IV. CONCLUSION

Cette analyse globale, hydrologique et sédimentaire, des lacs collinaires du réseau pilote de surveillance hydrologique

des petites retenues de la Dorsale tunisienne et du Cap Bon a permis de comprendre le fonctionnement des petits bassins versants de ces deux régions et d'en déduire les caractéristiques des bassins versant qui peuvent aider les concepteurs d'ouvrages hydrauliques à définir des volumes de stockage adaptés à leurs capacités de ruissellement et tenant compte de l'érosion des sols sur ces mêmes bassins. Une connaissance, même sommaire des caractéristiques pluviométriques, physiques et anthropiques des bassins versants, permet en effet de prévoir, de manière assez grossière mais suffisante pour un projet d'aménagement, les fonctionnements hydrologique et sédimentaire des ouvrages hydrauliques construits à leurs exutoires.

Cependant, aucun de ces critères, pris séparément, s'il ne dépasse un certain seuil, ne permet la prédétermination

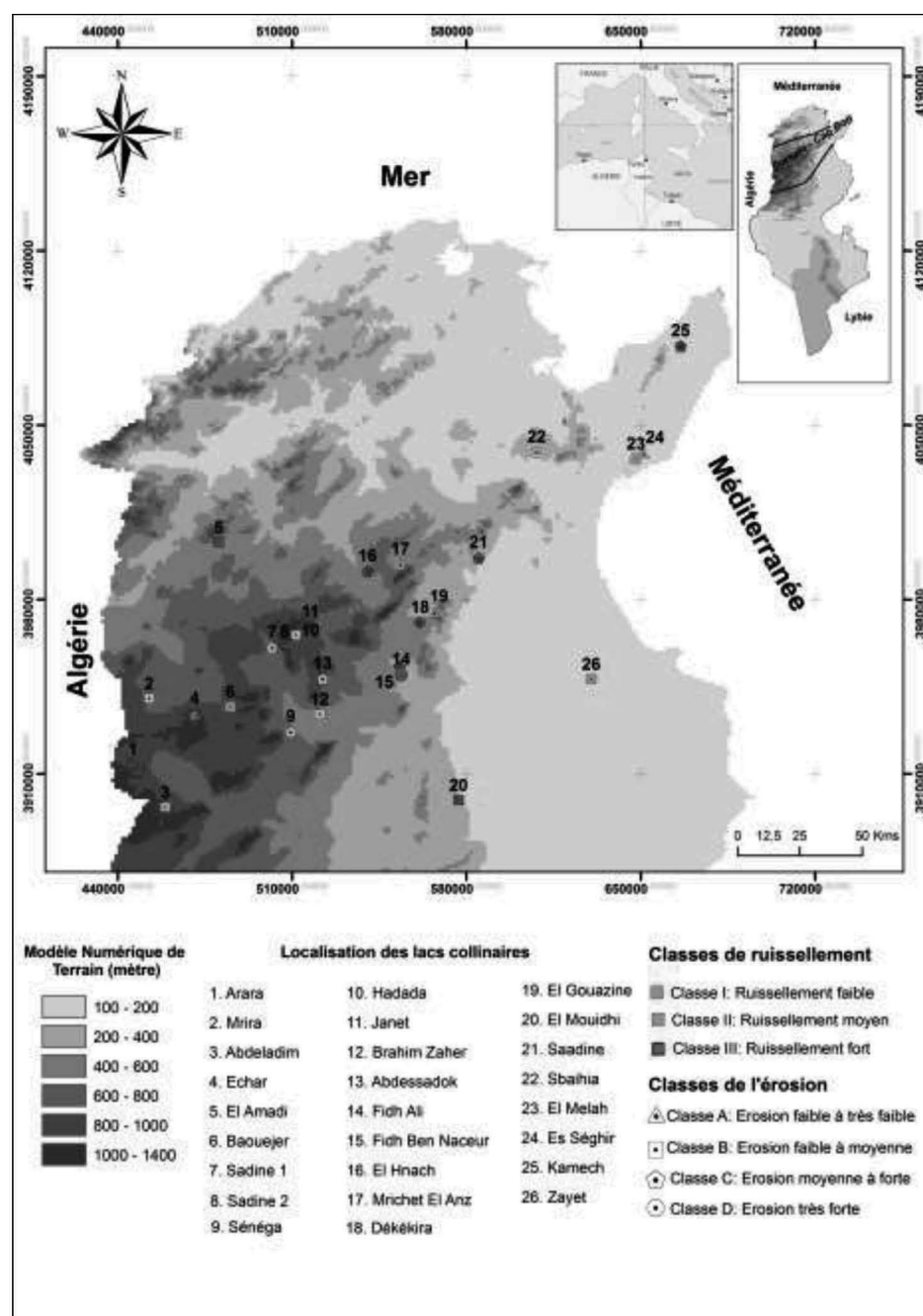


Figure 3 : Classification des lacs collinaires du réseau pilote de surveillance selon les caractéristiques hydrologiques et sédimentaires.

de l'érosion des sols des petits bassins versants en zone semi aride. Pour la pente moyenne du bassin, elle doit être inférieure à 25 m.km^{-1} pour que l'érosion spécifique du bassin versant soit très faible. Pour la lithologie, la couverture du bassin en roches dures doit être supérieure à 40 % de sa superficie pour que celle-ci joue un rôle significatif de réduction de l'ablation des sols. La mise en culture ne joue un rôle que pour une couverture du bassin supérieure à 50 % sur sols marneux ou argileux et sur de fortes pentes. Les aménagements antiérosifs ne jouent un rôle important que sur pentes moyennes à faibles. Sur des pentes fortes, les aménagements antiérosifs en banquettes semblent donc jouer un rôle marginal sur la protection des sols contre l'érosion à l'échelle du bassin versant, alors que l'importance des calcaires et du grès détermine la croissance du ruissellement en

fonction de la pluie annuelle et la proportion de sédiments dans les volumes ruisselés.

Sans aménagement antiérosif, l'envasement des retenues peut être rapide quand les bassins sont très cultivés et les sols vulnérables à l'érosion, sur argiles ou marnes. Avec des aménagements anti-érosifs ou avec un couvert forestier bien développé, la durée de vie des lacs est allongée mais l'alimentation en eau n'est plus garantie annuellement, d'autant moins garantie que l'aridité du climat est accentuée. Ainsi, avec la création d'un lac collinaire, lorsque la retenue sert à l'alimentation en eau d'un petit périmètre irrigué, ce qui est souvent le cas en climat semi-aride, il faut envisager une limitation de l'extension des aménagements antiérosifs afin de permettre une alimentation en eau régulière de la retenue. Il faut également envisager de dimensionner la capacité de

stockage des retenues en tenant compte des apports solides susceptibles de les combler.

V. REFERENCES ET CITATIONS

- ALBERGEL J. ET REJEB N. (1997) — Les lacs collinaires en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. *Comptes-Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. **83(2)** : 77-88.
- BOUFAROUA M., LAMACHERE J.M., DEBABRIA A. ET KSIBI F. (2006) — Prédétermination de l'envasement des lacs collinaires de la Dorsale tunisienne. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi Arid Environments. Marrakech, Morocco*.
- CADIER E. ET DUBREUIL P. (1986) — Influence de la taille et du nombre des retenues sur les régimes hydrologiques des petits bassins du Nordeste brésilien. *XIX^e Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France. 9-11 septembre 1986. Paris*. 6 p.
- CADIER E., MOLLE F., DE ALBUQUERQUE C.H.C., DOHERTY F.R., MONTGAILLARD M. (1990) — Dimensionnement de petits barrages dans le Nordeste Brésilien semi-aride. *Journées Hydrologiques de Montpellier*, 173-200.
- CONAC G., SAVONNET GUYOT C., CONAC F. (1984) — Les politiques économiques de l'eau en Afrique. Développement agricole et participation paysanne. Acte du colloque de la Sorbonne 1983. Economica ed., Paris.
- CORMARY Y. ET MASSON J.M. (1964) — Etude de conservation des eaux et du sol au Centre de Recherche du Génie Rural de Tunisie. Application à un projet type de l'équation de perte de sols de Wischmeier. *Cahiers ORSTOM, Pédologie*, **2(3)** : 3-26.
- D CES (DIRECTION DE LA CONSERVATION DES EAUX ET DU SOL) (2000) — Les lacs collinaires en Tunisie : Un instrument de développement. ONAGRI.URL.
- D CES - IRD (2001) — Annuaire hydrologiques des lacs collinaires 1999-2000. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, IRD Tunis.
- D CES - IRD (1999) — Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1997-1998. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, IRD Tunis. 208 p.
- D CES - IRD (2000) — Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1998-1999. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, IRD Tunis. 204.
- D CES - ORSTOM (1997) — Annuaire hydrologiques des lacs collinaires 1995 - 1996. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, IRD Tunis.
- DARVES-BORNOZ R. ET CLEMENT R. (1957) — Les lacs collinaires italiens. *Rapport de Mission B.T.G.R.* **36** : 67 p.
- DG ACTA - IRD (2007) — Annuaire hydrologiques des lacs collinaires 2001, 2002, 2006. Réseau pilote de surveillance hydrologique. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, IRD Tunis.
- DG ACTA. (2009) — Les lacs collinaires : Avancement des réalisations, Stockages et Exploitation jusqu'au juin 2009. Ministère de l'agriculture de Tunisie, DG/ACTA, Tunis. 42 p.
- DUBREUIL P. (1985) — Quelques problèmes de l'eau rencontrés au Brésil. *La houille Blanche*. **2** : 112-122.
- EL AMAMI S. (1984) — Les aménagements hydrauliques traditionnels en Tunisie. CRGR Tunisie.
- ESTRADA AVALOS J., LAMACHERE J. M. ET THIEBAUX J.P. (2004) — Modélisation hydrologique globale conceptuelle appliquée aux petits bassins versants en zone semi-aride du nord-Mexique. *Revue des sciences de l'eau*. **17(2)** : 195-212.
- FRITSCH J.M. (1992) — Les effets du défrichement de la forêt amazonienne et de la mise en culture sur l'hydrologie de petits bassins versants. Opération ECEREX en Guyane française. *Thèse de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Editions de l'ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Paris*. 392 p.
- HERMASSI T. (2000) — Analyse des facteurs conditionnels de l'écoulement et de l'érosion des lacs collinaires sur la dorsale tunisienne. *Projet de fin d'études de l'Institut National Agronomique de Tunisie*. 68pp. + annexes.
- HERMASSI T., HABAIEB H., DEBABRIA A. ET LAMACHERE J.M. (2011) — Fonctionnements hydrologique et sédimentaire des lacs collinaires du Gouvernorat de Kairouan. Workshop international. Les ressources en eau dans la plaine de Kairouan : Contraintes naturelles et évolutions sociales. 16-17 novembre 2011, INAT, Tunis, Tunisie.
- LEPRUN J.C., DA SILVEIRA C.O., SOBRAL FILHO R.M. (1986) — Efficacité des pratiques culturales antiérosives testées sous différents climats brésiliens. *Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*. **22(2)** : 223-233.
- LAMACHERE J.M., BOUFAROUA M., GUERMAZI L., HABAIEB H. (2006) — Prédétermination des apports liquides et solides dans les lacs collinaires de la Dorsale tunisienne. *14th International Soil Conservation Organization Conference. Water Management and Soil Conservation in Semi Arid Environments. Marrakech, Morocco*.
- MASSON J.M. (1971) — L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen. Méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ, Montpellier. *Thèse de Doc. Ing. de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc*. 244
- MOLLE F., CADIER E., CAMPELLO S. (1986) — Modélisation du fonctionnement de retenues d'eau utilisées pour l'irrigation. *XIX^e Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, 9-11 septembre 1986. Paris*. 1.11
- NASRI S. (2002) — Impact hydrologique des banquettes sur les apports liquides et solides dans les lacs collinaires en zones semi-arides de la Tunisie. *Bull Réseau Erosion*. **21** : 115-29.
- ROOSE E. (1977) — Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : 20 années de mesures en petites parcelles. ORSTOM, Paris. Coll. Travaux et Documents. **130** : 105 p.
- SELMi S. ET NASRI S. (1997) — Les lacs et retenues collinaires en Tunisie. Tunis. Collection ORSTOM, Institut de recherche pour le développement. **53**
- WISCHMEIER W. H., SMITH D. D. (1978) — Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. *USDA Handbook*. **537** : 59.