

## REGIONALISATION DE L'ENVASEMENT DES RETENUES COLLINAIRES :APPLICATION AUX LACS COLLINAIRES DE LA DORSALE TUNISIENNE

### REGIONALIZATION OF SEDIMENT LOADS IN THE SMALL DAMS OF THE CENTRAL TUNISIA

Ayadi Imen<sup>1</sup>, Abida Habib<sup>2</sup>, Djebbar Yassine<sup>3</sup> & Mahdjoub Md Raouf<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université de Sfax, Tunisie, [ayediimen77@yahoo.fr](mailto:ayediimen77@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Université de Sfax, Tunisie, [habib.abida@voila.fr](mailto:habib.abida@voila.fr)

<sup>3</sup> Centre Universitaire de Souk-Ahras Antérieurement Ingénieur Senior, GVRD,  
Vancouver, Canada; [Ydjebbar@Yahoo.com](mailto:Ydjebbar@Yahoo.com)

<sup>4</sup> ESIER, Tunisie, e-mail: [mahjoub\\_raouf@yahoo.fr](mailto:mahjoub_raouf@yahoo.fr)

**Résumé :** En raison d'une érosion hydrique importante favorisée par des conditions hydro-morphologiques défavorables, le problème de l'envasement entraîne une perte importante de la capacité des ouvrages de rétention en Afrique du Nord. Par conséquent, la mesure de l'envasement des retenues présente des intérêts technique et économique certains pour la planification, la conception et la gestion durable des ressources hydriques. La présente étude porte sur un échantillon de 24 lacs collinaires situés en Tunisie centrale et vise à contribuer à la quantification du dépôt solide dans ces dernières. La méthodologie adoptée combine une méthode paramétrée et non paramétrée. Dans la première partie, une méthode paramétrée cherche les facteurs explicatifs de l'envasement en utilisant les composantes principales (ACP) et l'analyse factorielle discriminante (AFD). Les paramètres les plus explicatifs du taux d'envasement des lacs collinaires offrant les meilleures régressions sont l'indice de pente global (Ig) et le coefficient d'écoulement (Ke). En deuxième lieu, la prédiction du taux d'abrasion (Ta) est effectuée en utilisant la méthode des réseaux neuronaux. Un modèle de réseau de neurones est développé en utilisant les résultats de l'analyse des facteurs explicatifs de la première partie. La comparaison des prédictions par la méthode des réseaux neuronaux avec ceux des méthodes existantes montre que la première donne de meilleurs résultats.

**Mots Clés** : envasement, lac collinaire, ACP, AFD, réseaux neuronaux.

**Abstract** : This study presents and compares parametric and non parametric methods for regionalization of sediment loads. These latter are correlated to watershed physiographic characteristics and precipitation regime. Data from 24 small dams located in Central Tunisia are used. First, parametric methods (Principal Component and Discriminant Factorial Analyses) were used to identify the most important factors which affect sedimentation. Then, the non parametric method of Neural Networks is used to estimate sediment loads. The predominant factors which affect sedimentation and sediment loads were found to be the watershed average slope and the flow coefficient. Compared to results obtained by existing parametric methods, sediment load estimates generated by the developed Neural Networks model were found to be much closer to observed values.

**Keywords** : sedimentation, small dams, APC, DFA, neural networks.

## **INTRODUCTION**

En Tunisie, et en Afrique du Nord en général, et en raison d'une érosion hydrique importante favorisée par l'agressivité des pluies, l'alternance de périodes sèches et humides, la fragilité des formations géologiques et l'action anthropique, le problème de l'envasement entraîne une perte importante de la capacité des ouvrages hydrauliques. Par conséquent, la mesure et surtout la prédiction de l'envasement des retenues présentent un intérêt certain pour la gestion durable des ressources hydriques. L'expérience acquise au cours des dernières décennies, qui ont vu la création de nombreux ouvrages hydrauliques en Tunisie, montre que les sédiments piégés occupaient en l'an 2000 un volume de 450 millions de m<sup>3</sup>, soit environ 20% de la capacité globale initiale (Abdelhedi, 2000). Ce constat est général dans tous les pays du Maghreb. D'autre part, l'expérience mondiale évalue le taux de sédiments déversés par les évacuateurs de crues entre 3 et 10% du volume global des sédiments emmagasinés (Gazzalo et al, 1969 ; Karaouchov, 1977). L'infrastructure hydraulique des pays du Maghreb est amputée de 2 à 2,5% de la retenue globale (Kassoul et al, 1977). Pour y remédier, il est nécessaire, en premier lieu, d'avoir un outil fiable qui puisse prédire le comportement futur à moyen et à court terme du problème l'envasement.

La présente étude vise à contribuer à la quantification du dépôt solide dans les retenues. Cette analyse utilise des données à partir de 24 lacs collinaires de la dorsale tunisienne (Fig.1).

## **PRESENTATION DE LA BANQUE DE DONNEES**

La dorsale tunisienne, où se situent les 24 lacs collinaires, est caractérisée par un climat semi-aride et une pluviométrie comprise entre les isohyètes 250 et 500 mm. Les pluies sont rares et très irrégulières durant l'année, avec un maximum enregistré en automne et au printemps. Ces pluies sont parfois brutales et orageuses. Elles sont liées à des humidités relativement faibles en été et assez élevées en hiver. Les températures de cette zone sont fortement continentales et à grande amplitude moyenne annuelle (18 à 20° C). La dorsale Tunisienne est une région constituée d'une succession de Djebels, où les affleurements géologiques sont constitués en majorité par des plis calcaires ayant des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi - forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole (Mahjoub et al, 2001). Le tableau 1 récapitule l'ensemble des paramètres hydromorphométriques de l'ensemble des bassins versants considérés.

La méthode de mesure du taux d'envasement est celle mise au point en 1996 par le laboratoire d'hydrologie de la mission IRD-Tunis (Pépin, 1996). Elle est basée sur la levée bathymétrique des fonds de la retenue le long des profils transversaux préalablement repérés. Les profondeurs sont mesurées manuellement à l'aide d'une perche graduée en centimètre.

## **METHODOLOGIE ET APPROCHE D'ANALYSE**

La méthodologie adoptée est simple et vise à identifier les facteurs explicatifs de l'envasement et enfin produire une relation régionale et ce, grâce à l'utilisation combinée des outils statistiques paramétriques et non paramétriques. La méthode paramétrique est basée sur la régression multiple : l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse factorielle discriminante (AFD). La méthode non paramétrée est basée sur la méthode des réseaux neuronaux.

L'application de la méthode de régression multiple consiste à déterminer les liens préférentiels entre le taux d'abrasion ( $T_a$ ) et les différentes variables quantifiables hydro-morphologiques. Les paramètres les plus explicatifs du taux d'envasement des lacs collinaires offrant les meilleures régressions ont été identifiés en premier lieu. Les outils statistiques d'analyses en composantes principales (ACP) et d'analyses

factorielle discriminante (AFD), confirmant les résultats obtenus par la régression multiple, ont pu mettre en évidence trois groupes de lacs collinaires:

- 1.un premier groupe présentant des bassins ayant de fortes valeurs du taux d'abrasion et du coefficient d'écoulement,
- 2.une seconde classe qui regroupe les bassins dont les caractéristiques ne présentent aucun caractère particulier sauf pour des valeurs faibles du taux d'érosion et du coefficient d'écoulement,
- 3.quant à la sédimentation relative au troisième groupe, elle se caractérise par un caractère intermédiaire du taux d'abrasion influencé surtout par les reliefs assez importants.

L'erreur de prédiction de cette méthode, considérée comme faisant partie des méthodes paramétrique, reste élevée. Le manque d'une bonne prédiction des méthodes paramétrées est due aux facteurs suivants : (i) la qualité des données, (ii) les données utilisées dans le développement des modèles sont limitées et ne couvrent pas les intervalles d'application pratiques, (iii) la limitation des méthodes paramétrées où la forme du modèle doit être connue à priori, et en fin (iv) le changement naturel de la forme des relations liants les variables dépendants aux variables indépendants d'un intervalle à autre.

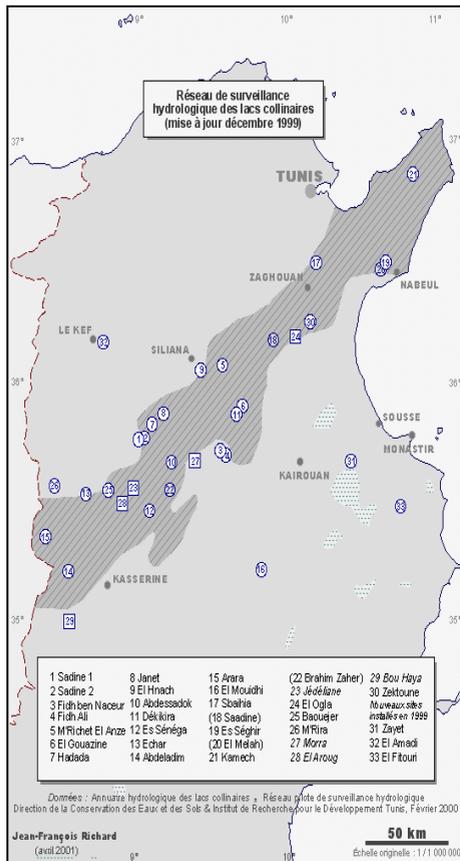


Fig. 1a. Localisation géographique de la zone d'étude

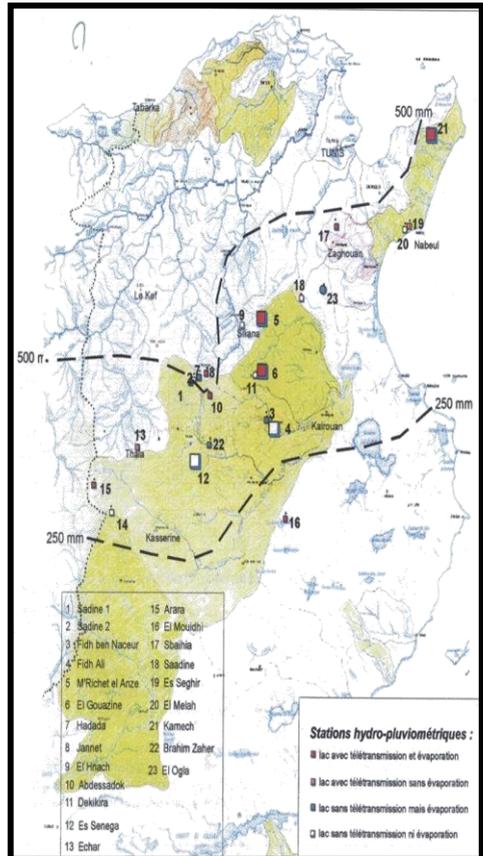


Fig. 1b. Carte d'emplacement des stations hydro pluviométriques des 24 lacs collinaires

Tableau 1. Caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants étudiés

N	Nom	S	P km	Ic	L km	L m	Ig m/km	Alt <sub>max</sub> m	Alt <sub>min</sub> m	ΔH m	Dd km/Km <sup>2</sup>
1	Sadine1	384	9,7	1,3	3,8	1,0	105,8	250	842	408	3,1
2	Sadine2	653	16,8	1,8	7,5	0,8	57,8	267	825	442	2,7
3	M'Richet	158	5,5	1,2	1,9	0,8	72,4	730	590	140	3,3
4	Hadada	469	9,9	1,2	3,7	1,2	94,2	246	900	346	2,9
5	Jannet	521	12,9	1,5	5,5	0,9	67,0	191	820	371	6,8
6	ElHanech	395	9,5	1,3	3,7	1,0	104,3	834	447	387	3,4
7	Abdessadok	307	7,9	1,2	2,9	1,0	127,8	189	815	374	5,3
8	Fidh Ben Naceur	169	5,7	1,2	2,0	0,8	54,6	462	350	112	5,1
9	FidhAli	412,5	6,6	1,2	2,2	1,0	38,1	444	335	109	8,6
10	El Gouazine	810	25,8	1,7	11,3	1,6	17,5	575	376	199	4,5
11	Dékikira	307	7,6	1,2	2,6	1,1	36,9	479	380	99	4,6
12	Saadine	272	8,2	1,4	3,3	0,8	92,5	552	245	307	3,9
13	Sbahia1	324	7,3	1,1	2,2	1,4	77,1	473	300	173	4,5
14	Es Séguir	431	10,0	1,3	3,9	1,1	40,9	231	70	161	5,8
15	El Melah	85	4,1	1,2	1,5	0,6	36,1	144	90	54	6,8
16	Kamech	245,5	7,2	1,3	2,7	0,9	39,6	203	95	108	5,1
17	Es Sénégal	363	8,5	1,2	3,0	1,2	87,0	883	618	265	4,9
18	Abdelahdim	642	11,5	1,2	4,2	1,5	45,2	224	113	194	4,5
19	Arara	708	13,8	1,4	5,6	1,2	77,8	352	910	442	5,4
20	ElMouidhi	266	7,7	1,3	2,9	0,9	43,4	363	235	128	7,8
21	Baouejer	486	10,5	1,3	4,0	1,2	32,5	118	987	131	4,7
22	Brahim Zaher	464,4	12,8	1,6	7,5	0,8	79,9	115	570	445	6,0
23	M'Rira	613	12,3	1,3	4,9	1,2	34,7	940	770	170	3,1
24	Echar	917	15,5	1,4	6,2	1,4	39,4	190	970	220	3,6

Les méthodes paramétriques consistent à développer un modèle qui lie le taux d'érosion,  $Ta$ , aux paramètres hydro-morphologiques,  $X_i$ , de la retenue et de son bassin versant comme suit :

$$Ta = f(\alpha, \beta, \gamma \dots, X_1, X_2, \dots)$$

où  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$  sont des paramètres de régression. Ces paramètres sont déterminés par une méthode d'estimation comme la méthode des moindres carrés. Pour qu'elle soit satisfaisante et fiable, cette méthode nécessite : (a) une large base de données de développement et (b) des données assez exactes (Djebbar and al, 1998). Vu l'importance du problème, plusieurs chercheurs ont tenté de produire de telles relations. En effet, on compte aujourd'hui des dizaines de relations. Les auteurs ont tenté de produire une nouvelle relation mais les résultats préliminaires ont été non satisfaisants et, par conséquent, cette approche a été abandonnée.

Une deuxième alternative consiste à utiliser une méthode non paramétrique à base des réseaux neuronaux. Celle-ci résout les problèmes (iii) (iv) cités dans les paragraphes précédents. Durant les deux dernières décennies, les réseaux neuronaux ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression, surtout pour les problèmes de classification et de reconnaissance des formes. Les caractéristiques principales des réseaux neuronaux sont leur non linéarité et leur capacité d'inférer des relations, inconnues au préalable, entre les données. De plus, les réseaux neuronaux peuvent manier les données qui sont incomplètes et imprécises. Ces caractéristiques font des réseaux neuronaux un outil convenable pour les problèmes mal connus. Les principaux inconvénients des réseaux neuronaux résident dans le fait qu'ils sont difficiles à manier et peuvent être lents dans la recherche d'une solution durant l'étape du développement. Elles peuvent même échouer de trouver une.

Les réseaux neuronaux sont inspirés par le mode de fonctionnement du cerveau animal dans lequel un grand nombre de neurones sont interconnectés par leurs synapses. Par analogie, nous définissons le neurone comme l'unité de base du réseau. Comme montré dans la figure 2, ce neurone peut recevoir une entrée ou plus, peut calculer la somme pondérée,  $Z$ , et peut produire une sortie unique,  $Y$ , à travers la fonction de transfert  $f(Z)$ .

Le concept principal de calcul des neurones est la décomposition de la relation entrée-sortie en une série d'étapes linéairement séparables en utilisant les couches cachées (Fig. 2). Pour plus de détail le lecteur peut se référer aux articles 16 et 17.

Le développement d'un réseau de neurones suit les étapes suivantes. Nous définissons  $n$  variables d'entrée ( $x_1, \dots, x_n$ ),  $m$  variables de sortie ( $y_1, \dots, y_m$ ), et  $p$  neurones dans les couches cachées prédéfinies. En premier lieu, les poids associés à chaque connexion sont déterminés aléatoirement. Une fois le réseau est constitué, il est clair que pour un ensemble d'entrées, ce dernier produit un ensemble de sorties. À ce stade, il est nécessaire de changer (caler) les poids de chaque connexion afin que les sorties coïncident aussi proches que possible avec les sorties observées ou mesurées. Ce processus de calage des poids est appelé apprentissage du réseau. Il peut être effectué par plusieurs algorithmes tels que le modèle de 'backpropagation' qui est utilisé dans cette étude.

## **RESULTAT ET ANALYSE**

Comme première étape, la sélection de l'architecture et l'apprentissage de celle-ci ont été conduites. Il y avait quatre variables d'entrée identifiées et utilisées dans le développement du modèle; ce sont (Fig. 3):

1. le volume annuel des eaux pluviales.
2. le nombre d'événements de pluie dont la hauteur est supérieure à 10 mm
3. l'indice de pente global, et
4. le coefficient d'écoulement interannuel.

La sortie du réseau neuronal représente le taux d'érosion annuel. La solution du réseau neuronal est obtenue sur trois étapes: transformation des données, développement du réseau, et validation. Les données du développement sont composées des mesures d'envasement des 24 retenues durant plusieurs années comme le montre le tableau 1. Les données de la validation sont composées d'une partie des données de mesure qui n'ont pas été utilisées dans l'étape de développement.

Après une série de simulations, une architecture des couches cachées, 1 et 2, avec six et quatre neurones, respectivement, a été sélectionnée (Fig. 3). Les résultats de l'étape d'apprentissage montre une bonne corrélation entre les envasements simulées et observées (Fig. 4). L'écart d'erreur moyen dans l'étape d'apprentissage est de 18%. Les résultats de la phase de la validation étaient aussi impressionnants. Les Figures 5 et 6 comparent les résultats de différents modèles. Les prédictions des modèles Paramétriques ont des écarts d'erreur beaucoup plus importants que ceux des réseaux neuronaux. Les retombés économiques de tels résultats sont très importants. En effet, l'estimation de la durée de vie des retenues et des barrages se trouve nettement améliorée.

## **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

Il est clair que le modèle développé dans cette étude produit d'excellents résultats. Les variables utilisées sont moins nombreuses, plus faciles à déterminer et leur estimation est moins subjective. Ceci lui confère une robustesse vis-à-vis des autres méthodes. En effet, avec les méthodes existantes, différents utilisateurs arrivent à différents résultats, ce qui n'est pas le cas avec ce modèle.

Les résultats très encourageants nous ont poussé à proposer un programme futur qui inclut les éléments suivants :

1. Elargissement de la base de donnée au reste des retenues en Tunisie et en Afrique du Nord, vu la ressemblance des conditions physio climatiques de la région
2. Amélioration des variables indépendantes et inclure d'autres en vue de cerner toutes les variables importantes affectant le phénomène complexe de l'érosion.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- Abdelhedi, T., 2000 "L'envasement dans les barrages collinaires en exploitation en Tunisie," (DGBGTH) Article publié dans l'Acte de la DGRE, 18e journée des ressources en eau ; Transport solide des oueds en Tunisie ; INAZT, le 26 Avril 2001, Tunis., pp 41-44.
- DG/CES- IRD, 1995 "Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995, Réseau pilote de surveillance hydrologique," Ministère de l'Agriculture, Tunis, 140 p.

- DG/CES- IRD, 1997 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1995-1996, Réseau pilote de surveillance hydrologique,” Ministère de l’Agriculture, 184 p.
- DG/CES- IRD, 1998 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1996-1997, Réseau pilote de surveillance hydrologique.” Ministère de l’Agriculture, Tunis, 200 p.
- DG/CES- IRD, 1999 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1997-1998, Réseau pilote de surveillance hydrologique.” Ministère de l’Agriculture, Tunis, 208 p.
- DG/CES- IRD, 2000 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1998-1999, Réseau pilote de surveillance hydrologique,” Ministère de l’Agriculture, Tunis, 204 p.
- DG/CES- IRD, 2001 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1999-2000, Réseau pilote de surveillance hydrologique,” Ministère de l’Agriculture, Tunis, 160 p.
- DG/CES- IRD, 2002 “Annuaire hydrologique des lacs collinaires 2000-2001, Réseau pilote de surveillance hydrologique,” Ministère de l’Agriculture, Tunis, 206 p.
- Boufaroua, M., Albergel, J., & Pépin Y., 2000 “Bilan de l’érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne.” 5ème conférence internationale sur la géologie du Monde Arabe, Le Caire, du 21 au 24 Février 2000, pp 63-71.
- Gazzalo, T., & Bassi, G., 1969 “Contribution à l’étude du degré d’érosion des sols constituant les bassins des cours d’eau italiens,” Extraits de publication de l’Agence italienne hydraulique, N° 53.
- Karaouchov, A.V., 1997 “Les débits solides, analyse et répartition géographique,” Hydrométéozdat, Léninegrad, 283 p.
- Kassoul, M., Abdelgader, A., & Belorgey, M., 1997 “Caractérisation de la sédimentation des barrages en Algérie,” Revue scientifique de l’eau 10 (3).
- Mahjoub, M. R., Bergaoui, M., Souissi, A., & Boufaroua, M., 2001 “Régionalisation de l’envasement des lacs collinaires de la dorsale tunisienne,” Article publié dans le Sud et Sciences Technologiques du 7 novembre 2001, Semestriel des Ecoles Inter Etats IER/ETSHER ; 15 p.

- Pépin, Y., 1996 “Méthodes utilisées pour les mesures de l’envasement d’un lac collinaire en Tunisie,” Document technique, IRD. Tunis.
- Djebbar, Y. et H. Y. Lang (1999) “Infiltration and Inflow using the Rational Method Concept.” Proceedings of the CWRA Annual conference, October 26-29, Vancouver, British Columbia.
- Djebbar, Y. et P. Kadota (1998) “Dry Weather flow Estimation Model Using Neural Network.” Water Science and Technology Journal. Vol. 38, No. 10, pp. 215-222.
- Djebbar, Y. (2001) “Dynamic Control of Collection System Integrating O&M, SCADA, and Numerical Modeling Minimizes CSO and SSO.” WEF - Collection Systems 2001 Specialty Conference, July 8-11, 2001, Bellevue, Washington.