

CARACTERISATION DE L'ENVASEMENT DES LACS COLLINAIRES DE LA TUNISIE CENTRALE

AYADI Imen¹, ABIDA Habib², DJEBBAR Yassine³

1. Etudiante chercheur, Faculté des Sciences de Sfax, Route Soukra BP 802, 3018 Sfax, Tunisie, téléphone: 216 97358695, télécopie: 216 74274437, e-mail: ayediiimen77@yahoo.fr

2. Maître de conférences, Faculté des Sciences de Sfax, Route Soukra BP 802, 3018 Sfax, Tunisie, téléphone: 216 98952472, télécopie: 216 74274437, e-mail: habib.abida@voila.fr

3. Maître de conférences, Centre Universitaire de Souk-Ahras, 1553 Route Zaarouria, Souk-Ahras, 41000, Algérie ; téléphone : 213 61390205, télécopie : 213 37327835, e-mail ydjebbar@yahoo.com

ABSTRACT :

Cette étude s'intéresse à la quantification et la prévision du taux d'envasement de 24 lacs collinaires situés en Tunisie centrale en fonction des paramètres physico-climatiques des bassins versants. Une approche de régionalisation hybride de l'envasement qui combine les deux méthodes suivantes est proposée :

- La méthode paramétrique basée sur la régression multiple: l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse factorielle discriminante (AFD) et la classification hiérarchique.
- La méthode non paramétrique des réseaux de neurones

Comparé aux méthodes traditionnelles, l'erreur absolue de prédiction en utilisant la nouvelle méthode est généralement plus faible. Une méthodologie d'évaluation d'impact des travaux de conservation des sols et des eaux à travers la simulation des scénarios de contrôle de l'envasement est aussi présentée.

Mots clés: envasement, érosion hydrique, lac collinaire, ACP, AFD, classification hiérarchique, réseaux de neurones

INTRODUCTON:

L'accroissement de l'exploitation des ressources en eaux aux pays du Maghreb, en vue de satisfaire les divers besoins en eau potable, agricole et industrielle, incite à un besoin de connaissances aussi bien, du point de vue théorique que pratique, dans les domaines de l'érosion, du transport des sédiments dans les rivières et de l'envasement des retenues de barrages.

L'érosion hydrique est le facteur primordial à prendre en considération par les décideurs dans le domaine environnemental. Cet intérêt réside dans le fait que les impacts de ce phénomène aléatoire et récurrentiel peuvent se présenter dans plusieurs domaines. L'érosion naturelle et anthropique développent l'ablation de matériaux solides de bassins versants, générant ainsi le transport solide dans les fleuves, et entraînant des dépôts de sédiments dans les lacs et les barrages.

Les taux d'érosion dans le Maghreb et en Tunisie en particulier, sont parmi les plus élevés à l'échelle mondiale : ceci est favorisée par l'agressivité des pluies, les irrégularités climatiques élevées, la fragilité des formations géologiques, la torrencialité des écoulements dans les réseaux hydrographiques, la faible densité du couvert végétal et l'action anthropique. Les conséquences induites par le phénomène de l'érosion sont diversifiées et portent en particulier sur le problème de l'envasement entraînant une perte importante de la capacité des ouvrages hydrauliques. Par la suite, la mesure et surtout la prédiction de l'envasement des retenues présentent un intérêt certain pour la gestion durable des ressources hydriques.

En Tunisie, le problème de la quantification de l'envasement, malgré un suivi périodique demeure une préoccupation majeure, chaque fois que l'on veut planifier la construction et la gestion d'ouvrages hydrauliques. La construction d'un certain nombre de barrages collinaires sur les cours d'eau modifie en quelque sorte les conditions naturelles de l'écoulement des eaux de surface et du transport solide. Les bassins artificiels constituent donc des pièges à sédiments ; ce qui se traduit à moyen ou à long terme par une perte de la capacité de stockage de ces ouvrages ainsi que la réduction de leur durée de vie pouvant aboutir au comblement rapide de ces retenues lors de crues exceptionnelles.

L'expérience acquise au cours des dernières décennies, qui ont vu la création de nombreux ouvrages hydrauliques, montre que les sédiments piégés occupaient en 2000 un volume de 450 millions de m³ soit environ 20% de la capacité globale initiale (Abdelhedi, 2000). De plus, 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 Bassi, 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). En Tunisie, 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 de ces ouvrages hydrauliques, évaluée à 5 tonnes/ha /an pour les petits bassins versants (lacs collinaires) et 15 tonnes/ha/an pour les grands bassins versants (barrages) (Boufaroua et al, 2000).

Pour assurer un meilleur suivi et un meilleur contrôle des lacs collinaires et pour atténuer les effets néfastes de l'envasement sur leurs retenus, le Ministère Tunisien de l'Agriculture et des Ressources en Eau a installé en 1993 un réseau d'observations

hydrologiques et de surveillance des lacs colinéaires en partenariat avec l'institut de recherche pour le développement. Ce réseau comprend une multitude de lacs situés le long de la dorsale tunisienne et au Cap bon sous des climats allant de l'aride au sub-humide. Leurs bassins versants présentent des caractères très divers quant à la nature des sols et de leurs occupations (du milieu forestier au milieu agricole).

Cette étude qui porte sur un échantillon de 24 lacs collinaires situés en Tunisie centrale propose une approche de régionalisation hybride de l'envasement qui combine deux méthodes:

- La méthode paramétrique basée sur la régression multiple: l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse factorielle discriminante (AFD) et la classification hiérarchique des lacs collinaires.
- La méthode non paramétrique des réseaux de neurones.

1. PRESENTATION DE LA BANQUE DE DONNEES

La zone d'étude se trouve dans la dorsale semi-aride (Tunisie Centrale) comprise entre les isohyètes 250 mm et 500 mm. Elle est limitée, à l'Ouest, par la frontière algérienne (allant de la région de Kasserine vers le sud-ouest jusqu'à la région de Thala vers le nord-ouest) et à l'Est, par la presqu'île du Cap Bon au nord-ouest et par la zone Kairouanaise au sud-est (fig 1).

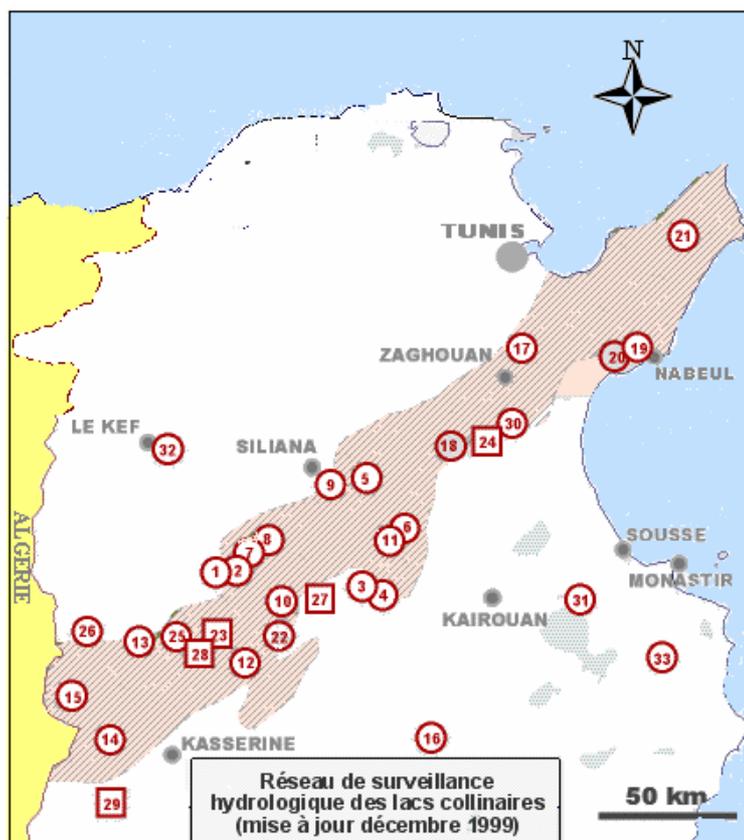


Figure 1 : Localisation géographique de la zone d'étude

Le climat de la zone d'étude est caractérisé par des pluies 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 est 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 montagneuses, ou 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. Outre, la majorité des bassins versants ont des superficies variant de quelques hectares à quelques dizaines de km² et se caractérisent par un relief modéré à fort (Mahjoub et al, 2001).

L'ensemble des statistiques des paramètres hydromorphométriques (la surface S, l'indice de pente Ig, l'altitude maximale Alt_{max} et la densité de drainage Dd) ainsi que les données météorologiques (l'intensité maximale de pluie enregistrée en 30 minutes Ip₃₀, le nombre de crues Ncr et le coefficient d'écoulement Ke, le débit maximum Q_{max}) sont résumés dans le tableau 1 et correspondent aux mesures obtenues pour les sept années consécutives (1994-2001) de suivi de l'ensemble des 24 lacs collinaires considérés.

La méthode de mesure est celle mise au point en 1996 par le laboratoire d'hydrologie de la mission IRD-Tunis (Pépin, 1996). Elle est basée sur le levée bathymétrique des fonds de la retenue le long des profils transversaux préalablement repérés. Le paramètre exprimant l'envasement a été normalisé en taux d'abrasion (Ta). Cette valeur est ramenée à une unité de surface du bassin pour une année hydrologique moyenne. A l'issu des caractéristiques hydro-morphologiques, le taux d'abrasion moyen obtenu, exprimant la sédimentation en t/ha/an, montre des valeurs qui varient dans une fourchette allant de 1,1 à 20 t/ha/an.

Tableau 1 : Statistique des paramètres hydromorphométriques des bassins versants

Variabes des BV	unité	max	min	moyenne
Surface S	ha	1810	85	493
Indice de pente	m/km	127,8	17,6	63,4
Coefficient d'écoulement	%	27,4	2,6	8,8
Nombre de crue	**	216	35	90,3
Intensité maximale 30	mm/h	78	15	49,4
Débit maximum	m ³ /s	112,8	2	40,6
Pourcentage Arb/for	%	89,3	0	19,7
Altitude maximale	m	1352	144	789,8
Densité de drainage	km ⁻¹	8,64	2,7	4,9
Taux d'abrasion	t/ha/an	20	1,1	9,8

2. METHODOLOGIE ET APPROCHE D'ANALYSE

La méthodologie adoptée 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), l'analyse factorielle discriminante (AFD) et la classification hiérarchique. La méthode non paramétrée est basée sur la méthode des réseaux neuronaux.

2.1. Méthode paramétrique

a. Méthode de régression multiple

La régression multiple est une méthode qui consiste à déterminer les liens préférentiels entre le taux d'abrasion (Ta) comme étant la variable à expliquer (ou régressende) et les différentes variables hydromorphométriques quantifiables explicatives (ou Régresseurs)

telles que les variables morphométriques, d'occupation du sol (couverture végétale) et hydro pluviométriques. Les paramètres qui ont plus de poids permettront de classer les lacs collinaires en fonction du contexte géographique. La régression multiple adoptée est une régression ascendante par Stepwise « ou pas à pas » dans laquelle on vérifie si l'introduction de nouvelles variables explicatives ne justifie pas l'élimination de variables déjà introduites dans le modèle.

b. Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) qui est appliquée en vue de vérifier les résultats obtenus par l'analyse des régressions, est une méthode d'analyse multi-variée, c'est à dire permettant l'étude simultanée d'un grand nombre de variables dont l'information totale ne peut pas être visualisée à cause d'un espace à plus de trois dimensions. Cette méthode permettrait de préciser les relations entre les variables hydromorphométriques, les phénomènes à l'origine de ces relations ainsi que les relations communes ou spécifiques à chaque système.

c. Analyse factorielle discriminante (AFD)

Dans le but d'expliquer la répartition des individus sur les axes de l'ACP, on a eu recours à une typologie et une analyse factorielle discriminante AFD. Il s'agit d'une méthode de découpage en classes d'individus selon une ou plusieurs variables quantitatives à expliquer. En effet, l'analyse factorielle discriminante permet d'identifier les axes qui différencient le mieux plusieurs groupes d'individus. Elle permet d'évaluer le poids de certaines variables quantitatives dans la construction de groupes d'individus constitués par les lacs collinaires.

d. Classification hiérarchique:

L'objectif fondamental de la classification hiérarchique consiste à grouper l'ensemble des lacs collinaires en des classes plus significatives permettant leur comparaison par la suite avec celles éditées par l'analyse en composantes principales et l'analyse factorielle discriminante. En effet, la classification hiérarchique consiste à fournir un ensemble de partitions de E, ensemble des n objets à classer de moins en moins finies obtenues par regroupements successifs des parties. Une classification hiérarchique se représente graphiquement par un dendrogramme c'est à dire un arbre dont les éléments terminaux sont les éléments classifiés. Chaque intersection au niveau de cet arbre est un nœud. Ce nœud représente une classe qui se décompose elle-même en 2 classes, l'aînée et la benjamine. C'est sur cette représentation qu'on peut travailler pour effectuer les coupures qui entraîneront le classement des éléments.

2.2. Méthode non paramétrique

L'erreur de prédiction de la méthode considérée comme faisant partie des méthodes paramétriques, reste élevée, vu que cette méthode nécessite : (a) une grande base de donnée de développement et (b) des données assez fiables (Djebbar et al, 1998). Face à l'importance du problème, plusieurs 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. Les caractéristiques principales des réseaux neuronaux sont leur non linéarité et leur capacité d'inférer des relations, inconnues au préalable, entre les données. Ces caractéristiques font des réseaux neuronaux un outil convenable pour les problèmes mal connus. L'architecture des 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.

Le développement d'un réseau de neurones suit les étapes suivantes. On définit 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. A ce stade, il est nécessaire de changer (caler) les poids de chaque connexion afin que les sorties coïncident aussi proche 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 tel que le modèle de 'backpropagation' (Djebbar et al, 1998) qui est utilisé dans cette étude.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Méthode paramétrique :

a. Méthode de régression multiple

La recherche des liens préférentiels entre la sédimentation et les facteurs retenus est effectuée par analyse du poids de chaque variable. Comme résultat de régression, il ressort que pour les 24 lacs collinaires de la dorsale Tunisienne, le coefficient d'écoulement (Ke) et l'indice de pente global (Ig) sont les paramètres les plus explicatifs de l'envasement (tableau 2). L'équation déduite de la régression multiple a la forme suivante:

$$Ta = 0.93 Ke + 0.1 Ig \text{ avec } R^2 = 0.89 \text{ et } N = 24$$

Le coefficient d'écoulement est un facteur qui varie beaucoup en fonction de la perméabilité du sol, de la pente, de la couverture végétale et de la nature du réseau hydrographique. L'indice de pente global est une des caractéristiques physiques du bassin versant étudié, il permet de déterminer la classe du relief.

Tableau 2: Estimation des coefficients de la régression multiple Stepwise

	Bêta estimé	Ecart-type Bêta	t si Bêta = 0	Prob > t
indice de pente	0.108	0.028	3.814	0.001
coefficient d'écoulement	0.933	0.172	5.431	0.000

Avec:

- Bêta estimé est le coefficient relatif au régresseur X_i de l'équation du modèle de régression.
- Ecart type est l'écart type relatif à ce coefficient estimé.
- t (si Bêta = 0) est le coefficient de Student correspondant à chaque coefficient de régression, il est égal au rapport entre le Bêta estimé et son écart type .
- $Prob > |t|$ est la probabilité associée au coefficient de Student t , de rejeter l'hypothèse H_0 : « Le coefficient Bêta est nul » alors qu'elle est vrai.

b. Analyse en composantes principales (ACP)

Les variables explicatives prises en compte pour l'analyse en composantes principales sont synthétisées au tableau. 1 et réparties en 10 variables et 24 individus. Les figures et les tableaux qui suivent, établis par le biais du logiciel **STATLAB**, permettent de fournir une perspective du système d'axes originels existants entre les variables. L'histogramme des valeurs propres de la matrice des corrélations (fig 2) présente le pourcentage d'information contenue sur chacun des axes créés. L'objectif est d'avoir une information concentrée sur un minimum d'axes.

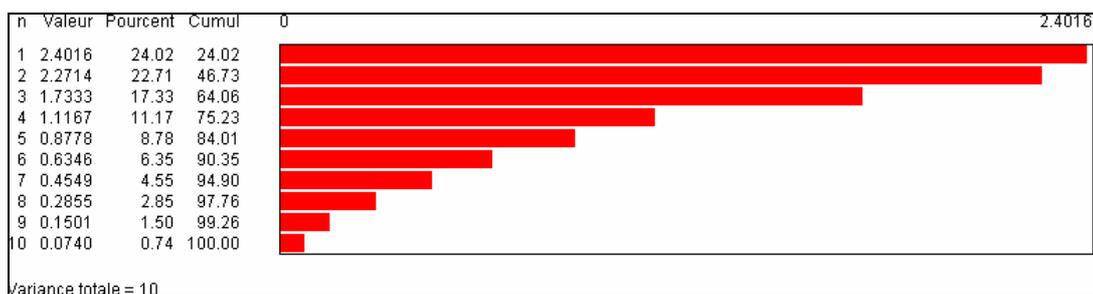


Figure 2: Les valeurs propres des axes de l'analyse en composantes principales

Le graphique des valeurs propres (fig.2) montre que le premier axe de l'ACP mobilise 24% de l'inertie totale du nuage de points, tandis que les axes 2, 3 et 4 mobilisent respectivement 22,7% ; 17,4% et 11,2% de l'inertie totale du nuage des points ; soit 75% pour les quatre premiers axes. La qualité d'explication semble être bien représentée par ces quatre premiers axes (tableau 3).

Tableau 3: Contributions des variables retenues pour la construction des axes de l'ACP

	Axe : 1		Axe : 2		Axe : 3		Axe : 4	
	Cor	Ctr	Cor	Ctr	Cor	Ctr	Cor	Ctr
abrasion	0.663	0.276	0.124	0.055	0.084	0.048	0.024	0.021
surface	0.577	0.240	0.005	0.002	0.239	0.138	0.000	0.000
débit max	0.272	0.113	0.138	0.061	0.279	0.161	0.173	0.155
coefficient d'écoulement	0.241	0.100	0.196	0.086	0.330	0.190	0.025	0.023
intensité 30	0.171	0.071	0.270	0.119	0.167	0.096	0.112	0.100
indice de pente	0.137	0.057	0.349	0.153	0.182	0.105	0.063	0.057
densité de drainage	0.123	0.051	0.291	0.128	0.027	0.015	0.284	0.254
altitude max	0.114	0.048	0.548	0.241	0.039	0.022	0.015	0.013
nbre de crue	0.065	0.027	0.314	0.138	0.135	0.078	0.029	0.026
arb/for	0.040	0.017	0.036	0.016	0.252	0.145	0.392	0.351

L'examen détaillé du tableau 3 ainsi que les répartitions des variables sur les axes de l'ACP (fig 3 et 4) confirme les résultats obtenus par la méthode de régression, à savoir l'indice de pente, le coefficient d'écoulement et le taux d'abrasion sont étroitement liés entre eux et évoluent dans le même sens. Ces résultats montrent qu' hormis la forme du relief du bassin et l'écoulement, la superficie tient un rôle important dans la variabilité du taux d'abrasion des lacs collinaires étudiés. Il serait donc judicieux de tenir compte de ce paramètre morphologique dans la régionalisation et l'estimation du taux d'envasement des lacs collinaires de notre zone d'étude. Aussi il est remarquable que l'axe 2 oppose les variables d'occupation du sol (Arb/For) au débit de pointe. Ces deux paramètres exercent deux rôles antagonistes sur l'érosion. La présence d'arbres ou de forêt tend à freiner l'érosion alors qu'une augmentation du débit de pointe engendre une augmentation du potentiel d'écoulement.

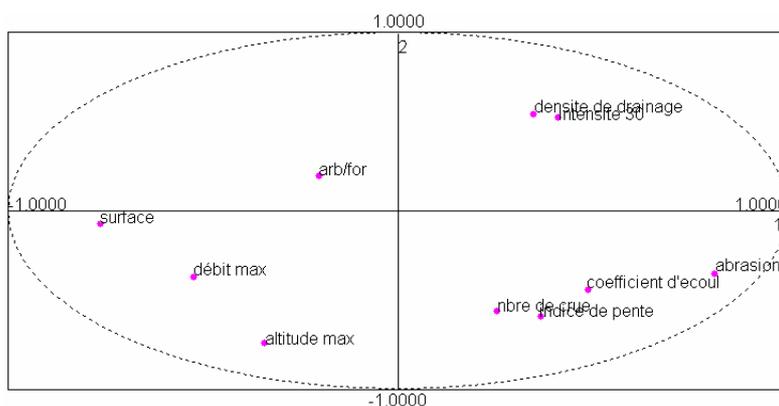


Figure 3: Représentation des variables sur les axes 1 et 2 de l'ACP.

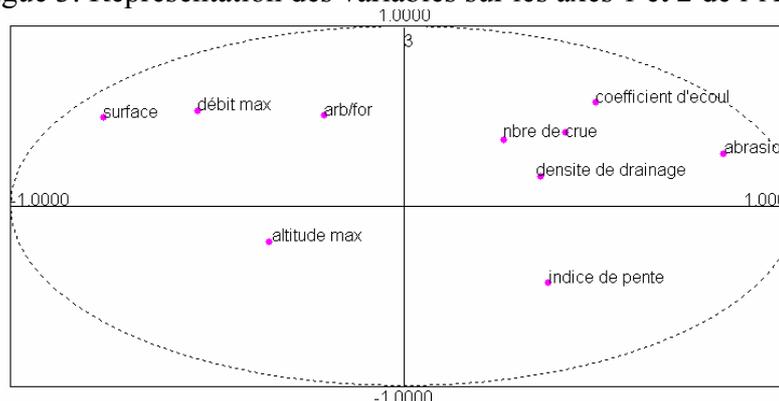


Figure 4: Représentation des variables sur les axes 1 et 3 de l'ACP.

c. Analyse factorielle discriminante (AFD)

Dans le but d'affiner l'analyse des relations existantes entre la variable expliquée (Ta) et les variables explicatives pouvant justifier la distribution et le regroupement des variables donnés par les axes de l'ACP, on a procédé à une analyse factorielle discriminante (AFD) en prenant la variable expliquée « le taux d'envasement (Ta) » comme paramètre discriminatif. La figure 5 présente le pourcentage d'information mobilisé et les variables associées aux valeurs propres des axes de l'AFD.

n	Valeur	Pourcent	Cumul	#	Valeur	Valeur	0	19.3601
1	19.3601	84.43	84.43	20	193.6007	131.4595		
2	3.5700	15.57	100.00	9	35.6999	44.0658		

Variance totale = 23

Figure 5: Les valeurs propres des axes de l'analyse factorielle discriminantes (AFD)

Le tableau 4 présente les valeurs des coefficients de corrélation des variables explicatives avec les axes de l'AFD ainsi que la qualité d'explication fournie par chaque variable pour la construction de chaque axe.

Tableau 4: Contribution des variables pour la construction des axes 1 et 2 de l'AFD

	Axe : 1		Axe : 2
	Qlt	Cor	Cor
nbre de crue	1.0021	0.9967	0.0054
abrasion	1.0036	0.9884	0.0152
coefficient d'écoulement	0.9916	0.9191	0.0725
densité de drainage	0.9858	0.7151	0.2707
surface	1.0153	0.3811	0.6342
intensité 30	0.9852	0.3189	0.6662
arb/for	1.0127	0.2095	0.8032
indice de pente	1.0116	0.1652	0.8464
débit max	1.0048	0.0259	0.9788
altitude max	1.0013	0.0023	0.9990

L'axe 1 de l'AFD recoupe à lui seul 82,7% de l'information totale. Cet axe est associé aux variables suivantes (nombre de crue, taux d'abrasion, coefficient d'écoulement, densité de drainage). L'axe 2 expliquant 17,3% de l'inertie totale du nuage de point est associé aux variables suivantes caractérisant l'impact de l'agressivité des pluies tels que le débit de pointe, l'intensité en 30 minutes et les autres variables : altitude maximale, indice de pente, le paramètre d'occupation du sol (Arb/For) et la superficie.

L'analyse du graphique de la figure 6 montre bien deux pôles de gradients opposés matérialisés d'une part par le taux d'abrasion et le coefficient d'écoulement que l'on peut baptiser: « processus d'apports solides aux retenues » en opposition à un second pôle caractérisé par la superficie et le paramètre d'occupation du sol (Arb/For) que l'on baptisera: « occupation des sols en fonction des caractéristiques physiques du bassin ». L'indice de pente et l'altitude maximale sont symétriquement opposés par l'axe 2 ; l'axe 1 oppose l'altitude maximale et la superficie. Ces résultats confirment ceux trouvés dans l'ACP et ont pour mérites de mettre en exergue le rôle joué par le relief du bassin dans les processus d'apports solides ainsi que l'impact des couverts forestiers sur les hauts bassins versants.

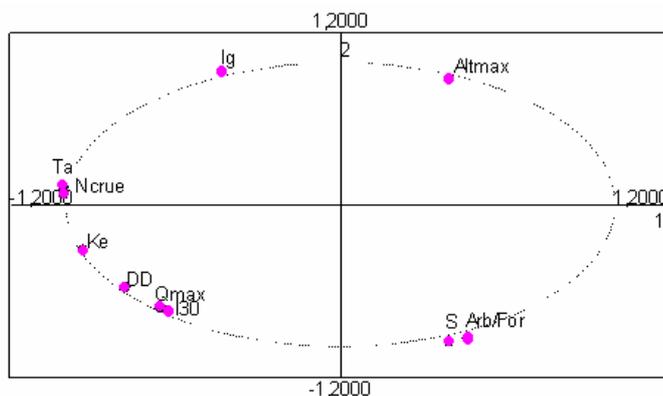


Figure 6: Représentation des variables sur les axes 1 et 2 de l'AFD.

Les répartitions des individus sur les axes 1 et 2 de l'AFD font ressortir un regroupement en trois classes de lacs collinaires. L'examen du graphique de la figure 7 permet de tirer pour chacun des groupes les critères suivants :

1. un premier groupe présentant des bassins ayant de fortes valeurs du taux d'abrasion ($Ta > 20$ t/ha/an) et du coefficient d'écoulement. Ce comportement s'explique par un écoulement et un ruissellement important des crues favorisé par un relief fort.
2. un second groupe qui renferme les bassins dont les caractéristiques ne présentent aucun caractère particulier sauf pour des valeurs faibles du taux d'érosion ($Ta < 10$

t/ha/an) et du coefficient d'écoulement. Ce comportement s'explique par des superficies importantes, des pentes moyennes ou fortes, des altitudes maximales élevées et des forêts dominantes ainsi que par un écoulement faible avec peu de crues exceptionnelles.

- quant à la sédimentation relative au troisième groupe, elle se caractérise par un caractère intermédiaire du taux d'abrasion ($11 < Ta < 20$ t/ha/an) influencé surtout par les reliefs assez importants et par une faible occupation arboricole du sol, inférieure pour la majorité à 11 % de leur superficie.

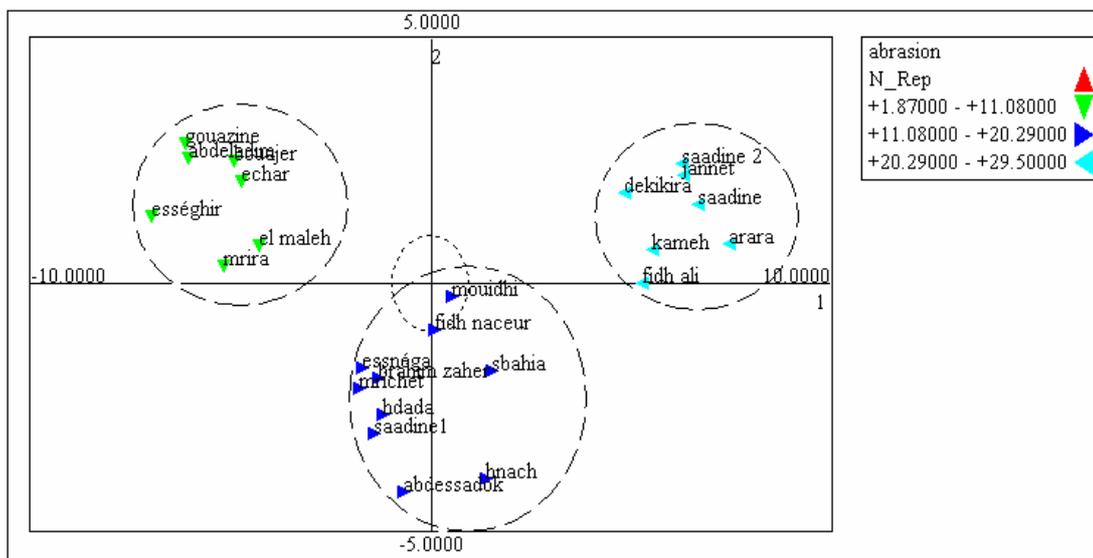


Figure 7: Représentation des individus sur les axes 1 et 2 de l'AFD (Taux d'abrasion)

d. Classification hiérarchique:

A l'aide du logiciel **STATLAB**, la classification hiérarchique est appliquée sur les 24 lacs collinaires de la dorsale Tunisienne en fonction des 3 variables offrant les meilleures corrélations à savoir : taux d'abrasion (Ta), coefficient d'écoulement (Ke) et indice de pente globale (Ig). La figure 8 montre le dendrogramme résultant de cette application hiérarchique. Il s'agit, en fait, d'un arbre dont les éléments terminaux sont les éléments classifiés. Chaque intersection de cet arbre est un nœud. Ce noeud représente une classe qui se décompose elle-même en 2 classes, l'aînée et la benjamine. Les classes éditées seront limitées entre elles par un noeud.

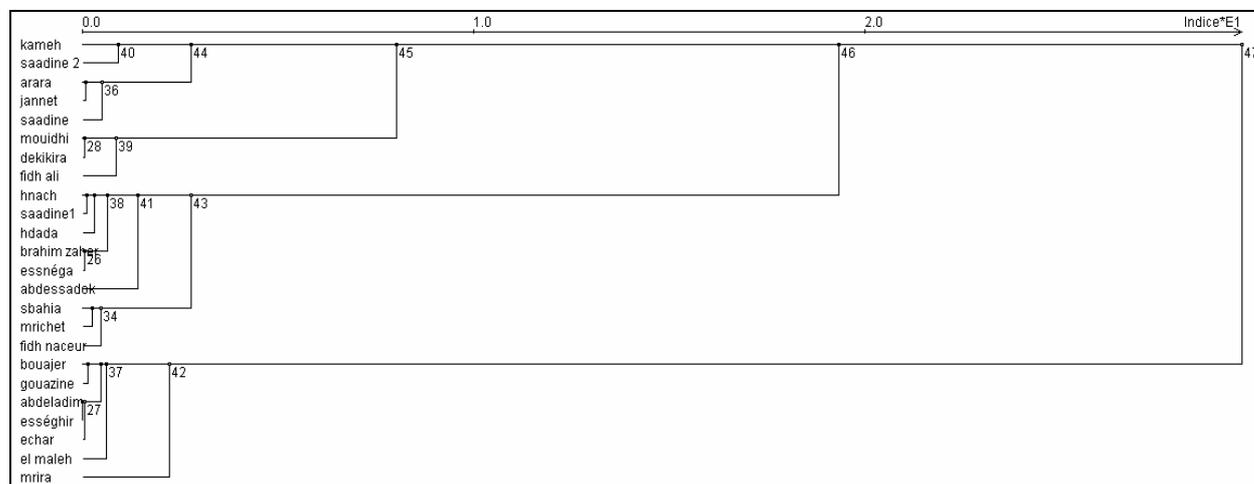


Figure 8: Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique

Il en ressort de cette analyse que la classification hiérarchique est très compatible avec celle éditée par l'analyse des différentes méthodes (la régression multiple, l'analyse en composantes principales et l'analyse factorielle discriminante) permettant d'identifier trois catégories de lacs collinaires qui est influencé par les facteurs de classification suivants : le taux d'abrasion, le coefficient d'écoulement K_e et l'indice de pente globale I_g en composantes principales.

3.2. Méthode non paramétrique :

Dans la première étape de l'approche non paramétrique, la sélection de l'architecture et l'apprentissage de celle-ci ont été élaborés. Il y avait neuf variables d'entrée identifiées et utilisées dans le développement du modèle comme le montre la figure 9:

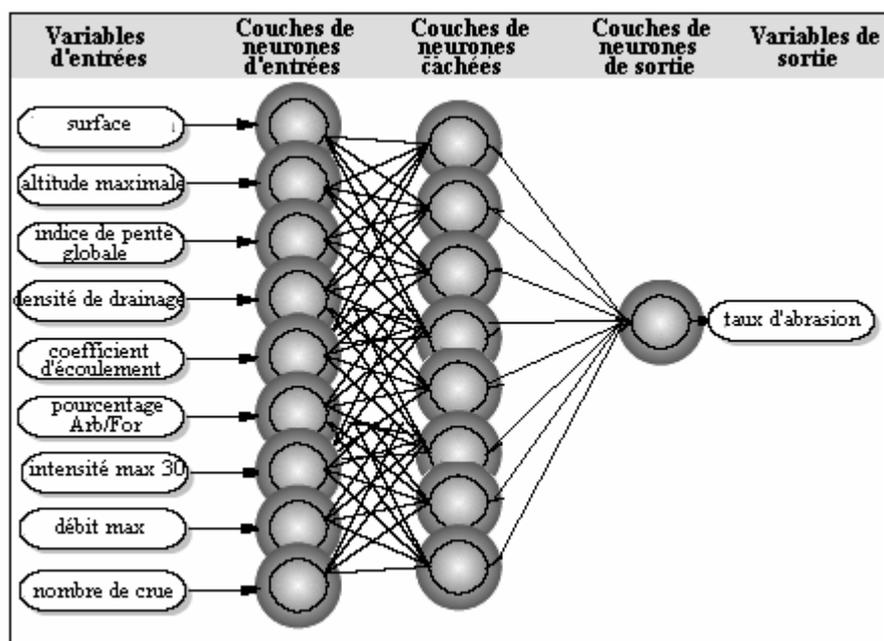


Figure 9 : Architecture du réseau choisi pour le modèle d'érosion des retenues.

La sortie du réseau neuronal représente le taux d'envasement 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 la période 1994-2001. 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 d'une seule couche cachée, avec huit neurones, respectivement, a été sélectionnée (fig 9). Les résultats de l'étape d'apprentissage montre une bonne corrélation entre les envasements simulés et observés (fig 10) avec un coefficient de corrélation de l'ordre 0,84. L'écart d'erreur moyen dans l'étape d'apprentissage est de 17%.

L'examen détaillé de la figure 11 dévoile que le coefficient d'écoulement et l'indice de pente globale présentent eux seuls le pourcentage de contribution le plus important lors de la simulation du neurone de sortie (taux d'abrasion) et ce comparé aux autres neurones d'entrées. Cette constatation confirme bien les résultats déjà générés moyennant la méthode paramétrique qui réside au fait que ces deux variables (I_g et K_e) sont les plus explicatives du phénomène d'envasement.

La figure 12 compare 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 retenus et des barrages se trouve nettement améliorée.

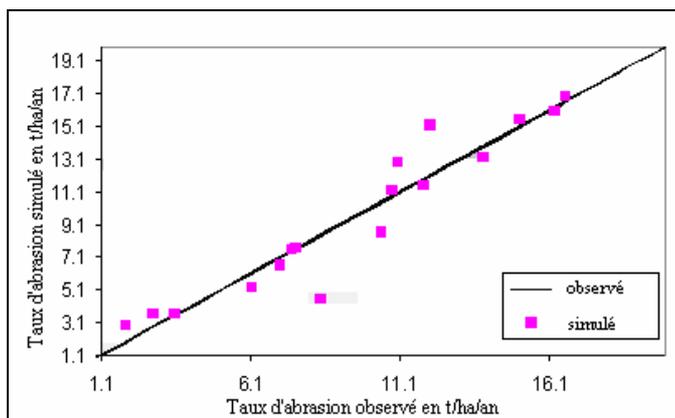


Figure 10 : Comparaison des valeurs d'envasement observés et simulés par la méthode des réseaux neuronaux pour les données de vérification.

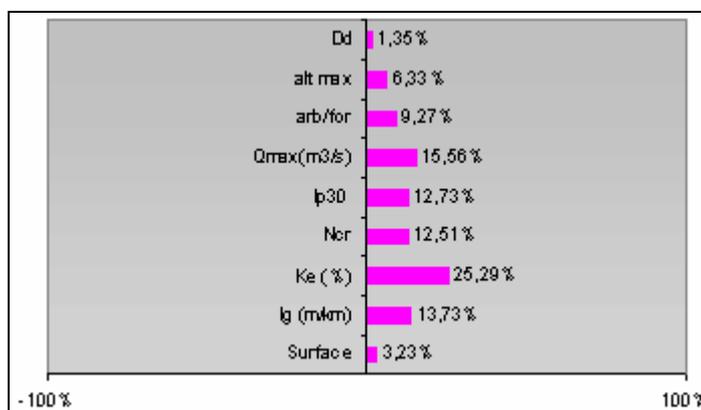


Figure 11 : Analyse de sensibilité des variables d'entrées du réseau neuronal.

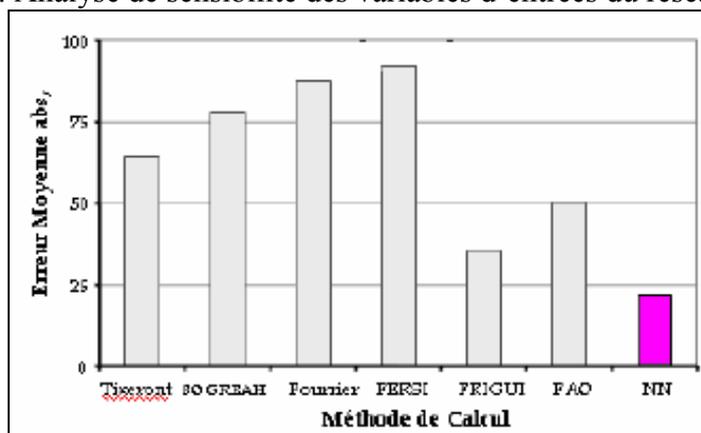


Figure 12: Comparaison de l'erreur de prédiction du taux d'envasement de plusieurs méthodes (NN: Réseau Neurone).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS:

Cette étude s'intéresse à l'établissement d'une méthode de classification des facteurs impliqués et la prédiction du taux d'abrasion afin de faire la régionalisation de 24 lacs collinaires répartis sur la dorsale tunisienne. Le traitement de ces données par différentes méthodes paramétriques a permis d'identifier trois catégories de lacs collinaires dont la sédimentation dépend de l'indice de pente globale et du coefficient d'écoulement.

Comparé aux méthodes traditionnelles, l'erreur absolue de prédiction en utilisant la nouvelle méthode est généralement plus faible. Les variables utilisées dans ce modèle sont moins nombreuses, plus faciles à déterminer et leur estimation est moins subjective. En plus, une méthodologie d'évaluation d'impact des travaux de conservation des sols et des eaux à travers la simulation des scénarios de contrôle de l'envasement est présentée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelhedi, T., 2000 L'envasement dans les barrages collinaires en exploitation en Tunisie, (DGBGTH) Article publié dans l'Acte de la DGRE, 18^{ème} journée des ressources en eau; Transport solide des oueds en Tunisie; INAT, le 26 Avril 2001, Tunis., pp 41-44.
- Boufaroua M., Albergel J. & Pépin Y., 2000 Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne. 5^{ème} conférence internationale sur la géologie du Monde Arabe. Le Caire, du 21 au 24 Février 2000, pp 63-71
- DG/CES- IRD, 1995 – 2001, Annuaire hydrologique des lacs collinaires 1994-1995, Réseau pilote de surveillance hydrologique, Ministère de l'Agriculture, Tunis.
- Djebbar, Y., & Kadota, P., 1998 Dry Weather flow Estimation Model Using Neural Network Water Science and Technology Journal. Vol. 38, No. 10, pp. 215-222.
- Gazzalo, T., & Bassi, G., 1969 Contribution à l'étude du degré d'érosion des sols constituants 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, Hydrometeozdat, Leningrad, 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.
- Pepin, Y., 1996 Méthodes utilisées pour les mesures de l'envasement d'un lac collinaire en Tunisie, Document technique, IRD. Tunis.