

Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement des lacs collinaires de la Tunisie centrale

[Mapping multifactor vulnerability to the siltation of small lakes of central Tunisia]

Olfa HAJJI¹, Sahar ABIDI¹, Taoufik HERMASSI², Hamadi HABAIEB², and Mohamed Mahjoub RAOUF³

¹Département de Génie rural: Eaux et Forêts,
Institut National Agronomique de Tunisie, Tunis-Mahrajène, Tunisia

²Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, 1004 Tunis, Tunisia

³Département Hydraulique et Aménagement,
Ecole Supérieure des Ingénieurs de l'Équipement Rural de Medjez El Bab, Bèja, Tunisia

Copyright © 2015 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In Tunisia, during the last two decades, hill lakes occupy an important place in national strategies and Water Conservation Soil (CES). In addition to their role in protecting the environment, hill lakes appear as local water available for agriculture. However, these water infrastructures are quite sensitive to sedimentation due to strong contributions. Water erosion affects nearly 3 million hectares of agricultural land in Tunisia, and is a threat to the sustainability of small dams to mobilize surface waters; where the dominant economic activity remains agriculture. Therefore, control methods are necessary to ensure sustainable land management and secure agricultural production. The objective of this study is to provide evidence for mapping and vulnerability to regionalize multifactor siltation of 26 small lakes located in Central Tunisia, along the Tunisian Dorsal to Cap Bon. The approach involves an analysis of the main factors of erosion: the rainfall erosivity, soil erodibility, slope and land use. The resulting maps are integrated into a Geographic Information System (GIS) using an additive combination to map vulnerability to siltation. This card is validated by field observations. Three classes of multi siltation vulnerability were distinguished: areas with low vulnerability (49.6%); areas with medium vulnerability (27.6%) and highly vulnerable areas (22.8%). This first draft map is a tool to help decision makers for the allocation of crop areas and sites that may contain socio-economic infrastructure on the one hand and used to planning strategies for the development and management of water resources and conservation of water and soil at the scale of small watersheds other.

KEYWORDS: GIS, typology, siltation, multifactorial vulnerability, hill lakes, Central Tunisia.

RESUME: En Tunisie, pendant les deux dernières décennies, les lacs collinaires occupent une grande place dans les stratégies nationales de Conservation des Eaux et des Sols (CES). Outre leur rôle de protection du milieu, les lacs collinaires apparaissent comme des réserves locales d'eau disponible pour l'agriculture. Néanmoins ces infrastructures hydrauliques sont assez sensibles à la sédimentation à cause des apports solides. L'érosion hydrique touche près de 3 millions d'hectares des sols agricoles en Tunisie, et constitue une menace pour la durabilité des retenues collinaires destinées à mobiliser les eaux de surface ; où l'activité économique dominante demeure l'agriculture. Par conséquent, des méthodes de contrôle s'avèrent nécessaires, afin d'assurer une gestion durable des sols et de sécuriser les productions agricoles. L'objectif de cette étude est de fournir des éléments pour cartographier et régionaliser la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement de 26 lacs collinaires situés en Tunisie Centrale, le long de la Dorsale Tunisienne jusqu'au Cap Bon. L'approche passe par une analyse des principaux facteurs de l'érosion : l'érosivité des pluies, l'érodabilité des sols, la pente et l'occupation des sols. Les cartes obtenues sont intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) à l'aide d'une combinaison additive pour

établir une carte de vulnérabilité à l'envasement. Cette carte est validée par des observations de terrain. Trois classes de vulnérabilité multifactorielle à l'envasement ont été distinguées : les zones à faible vulnérabilité (49,6 %) ; les zones à vulnérabilité moyenne (27,6 %) et les zones fortement vulnérables (22,8 %). Cette première ébauche cartographique est un outil devant aider les décideurs pour l'attribution des zones de cultures et des sites pouvant abriter des infrastructures socio-économiques d'une part et servira à une planification des stratégies pour le développement et la gestion des ressources en eau et la conservation des eaux et du sol à l'échelle des petits bassins versants d'autre part.

MOTS-CLEFS: SIG, typologie, envasement, vulnérabilité multifactorielle, lacs collinaires, Tunisie Centrale.

1 INTRODUCTION

L'instar des pays de l'Afrique du Nord, la Tunisie est parmi les pays les plus touchés par la gravité du phénomène de l'envasement, notamment sa partie Centrale. En réalité, la Tunisie Centrale, jouant un rôle important dans l'hydrologie du pays, est caractérisée par l'ampleur de l'érosion hydrique qui engendre un taux de comblement assez élevé (de l'ordre de 1.27%). Les premières études d'envasement des petites retenues furent apparues en 1993 avec un réseau d'observations hydrologiques et de surveillance des lacs collinaires en partenariat entre la Direction Générale de l'Arrondissement de Conservation des Eaux et des Sols et l'Institut de Recherche pour le Développement, pour assurer un meilleur suivi et contrôle des lacs collinaires. Bien que ces petits bassins artificiels constituent de bons pièges à sédiments, leurs capacités de stockage se trouvent elles aussi condamnées inexorablement au comblement rapide, évalué à 5 tonnes/ha/an, entraînant une réduction consécutive de leur durée de vie à moyen ou à long terme [1].

Etant donné que le processus d'alluvionnement est "à discontinuité temporelle et spatiale", la caractérisation et la prédiction numérique ou cartographique du phénomène de l'envasement se sont imposées en tant qu'outils d'aide à la décision pour une gestion rationnelle et durable des ressources en eau et en sols. Dans ce contexte, le recours aux traitements statistiques multi-variés se révèle comme étant un moyen efficace, d'une part, pour la définition des interactions déterminantes entre les différents facteurs hydro-morphologiques et anthropiques et le processus de sédimentation, et d'autre part, pour le développement d'une typologie de la variabilité spatiale de l'envasement [2].

La carte est un outil indispensable dans une démarche de lutte contre l'érosion. Elle permet de disposer d'une vue d'ensemble des zones menacées et de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire dans une perspective de gestion durable des sols.

C'est dans cette prospective que cette étude vise à régionaliser et cartographier la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement de 26 lacs collinaires situés dans la zone semi-aride de la Tunisie Centrale, en utilisant l'analyse en composantes principales et une caractérisation basée sur l'arbre hiérarchique.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA BANQUE DE DONNÉES

La zone d'étude se présente comme une succession d'alignements montagneux remarquables. Elle est consistée de 26 lacs collinaires répartis sur l'ensemble de la zone semi-aride tunisienne qui est comprise entre les isohyètes 250 et 600 mm, ayant un caractère orageux et intense en automne et au printemps, marquées par une grande irrégularité inter annuelle [3]. Ces pluies sont liées à des humidités relativement faibles en été, assez élevées en hiver. Les températures sont fortement continentales à grande amplitude diurne et annuelle (18° à 20° C). Ces conditions climatiques, sévères pour la région, occasionnent un déficit hydrique important et quasi-permanent, ce qui favorise l'appauvrissement du couvert végétal, et la dégradation des sols. Elle est située, à l'Ouest, entre la frontière algérienne (région de Kasserine vers le Sud-Ouest et la région de Thala vers le Nord-Ouest) et à l'Est tunisien, entre la presqu'île du Cap Bon au Nord-Ouest, la zone Kairouanaise et la partie amont des basses Steppes au Sud-Est (fig.1).

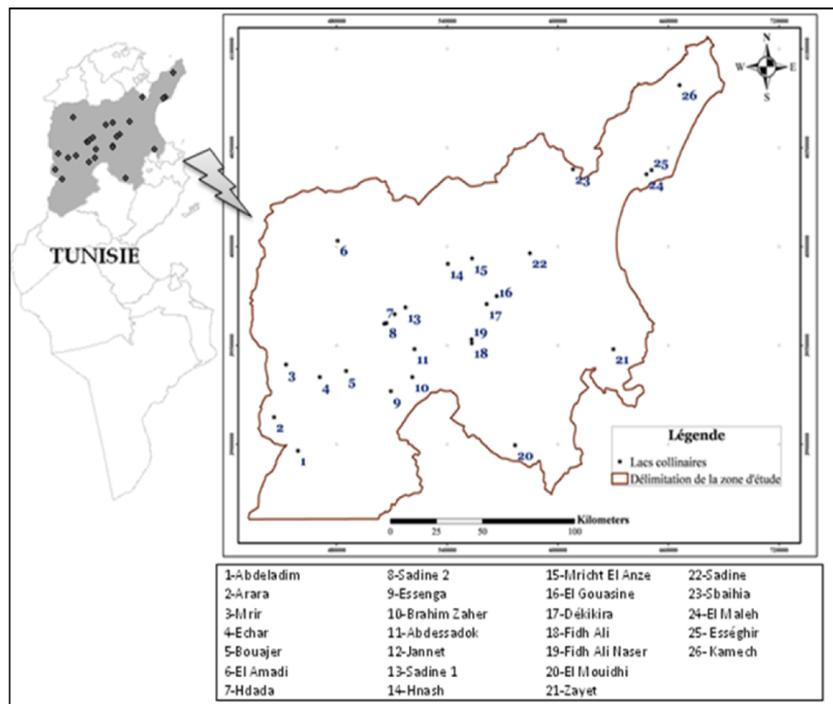


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

Ces retenues ont des impluviums très diversifiés allant d'un milieu semi-forestier plus ou moins anthropisé à un milieu totalement consacré à l'activité agricole. La superficie de leurs bassins versants varie de quelques hectares à quelques dizaines de km² [4]. Chaque lac collinaire est équipé d'une échelle limnimétrique, d'un pluviomètre journalier, d'un bac à évaporation et de deux centrales d'acquisition automatique de données. La première est reliée à un capteur pluviométrique à augets basculeurs (0.5 mm de pluie) et la seconde à une sonde immergée mesurant le niveau de l'eau au cm près et sa température. L'évacuateur de crue est aménagé pour disposer d'un seuil déversant permettant l'estimation des débits. L'évaluation des volumes des sédiments est réalisée à partir des mesures bathymétriques.

La majorité des informations utilisées ont été collectées à partir des publications (annuaires hydrologiques) de la Direction Générale de l'Aménagement et de la Conservation des Terres Agricoles (Ministère de l'Agriculture, DG/ACTA) en coopération avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Tunisie). Ces publications ont été élaborées durant la période comprise entre 1994 et 2006 dans le cadre du projet de recherche HYDROMED sur les lacs collinaires dans le pourtour méditerranéen [5].

2.2 MÉTHODOLOGIE ET APPROCHE D'ANALYSE

Les principales caractéristiques biophysiques des bassins versants étudiés, le long de la Dorsale et au Cap Bon, ont une importance majeure puisqu'elles interviennent, et souvent d'une façon combinée, dans les processus du ruissellement et du transport solide et par voie de conséquence dans le contrôle de la variabilité de l'envasement des retenues des lacs collinaires.

L'ensemble de ces variables (tableau ci-après) correspond aux mesures obtenues pour les douze années hydrologiques de suivi (1994-2006) de l'ensemble des 26 lacs collinaires considérés. On distingue les caractéristiques relevant de la topographie, la géologie et la lithologie du sol, les activités anthropiques, les paramètres hydro-climatiques, ainsi qu'un paramètre caractérisant l'efficacité géotechnique des lacs. Chaque catégorie possède une ou plusieurs entrées. L'analyse intégrée de cette base de données pourrait aider à la compréhension des facteurs dominants qui gouvernent la vulnérabilité des réservoirs face aux risques de l'érosion et de la sédimentation.

Afin d'identifier les principaux facteurs qui conditionnent la variabilité de processus érosif ainsi que l'envasement des retenues collinaires, une analyse multi-variée des variables synthétisés dans le tableau 1 est entretenue moyennant une analyse en composantes principales (ACP) et une caractérisation basée sur l'arbre hiérarchique (CH). L'étude a été appréhendée par le biais du logiciel statistique XLSTAT (2013) pour 216 observations issues de 26 individus (lacs collinaires) et 15 variables.

Tableau 1. Statistique des paramètres hydromorphométriques des bassins versants

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Cv	Cs	Ck
Surface : S (ha)	85	1810	476.15	0.70	2.74	10.20
Altitude moyenne : H _{max} (m)	108	1352	770.31	0.53	-0.11	-1.45
Pluie interannuelle : P _{inter} (mm)	267.4	673.7	430.41	0.27	0.41	-0.59
Débit max : Q _{max} (m ³ /s)	3	130	45.47	0.81	1.10	0.33
Lame ruisselée : Lr (mm)	4.47	152.83	44.52	0.91	1.65	2.10
Coefficient d'écoulement : Ce (%)	1.67	29.47	9.72	0.74	1.21	0.94
Rapport de la capacité initiale par l'apport liquide interannuelle : C/A	0.25	16.63	2.37	1.34	3.92	17.58
intensité de pluie maximale enregistrée en 30 minutes : I ₃₀ (mm/h)	29	252	90.13	0.71	1.70	1.93
Indice de compacité : Ic	1.1	4	1.43	0.38	4.40	20.91
Indice de pente globale : Ig (m/Km)	9	127.8	62.12	0.48	0.31	-0.65
Pourcentage de S % cultivée : S _{cultiv}	8	95	53.88	0.46	-0.12	-0.80
Pourcentage d'occupation des sols en arbres et forêts : % (arb-For)	0	89.3	18.81	1.28	1.33	1.22
Pourcentage de S occupée par des marnes ou argiles : % (ma-Ar)	30	100	74.42	0.22	-0.61	0.48
S aménagée en des travaux de conservation des eaux et des sols % CES	1	80	21.69	1.01	0.99	0.25
Taux d'envasement : Te(t/ha/an)	1.8	32.97	15.04	0.61	0.20	-0.98

* C_v : coefficient de variation, C_s : coefficient d'asymétrie, C_k : coefficient d'aplatissement.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans ce travail, on va se baser sur les analyses statistiques de type multi-variées pour gérer l'information fournis par les paramètres utilisées. Donc, après avoir interpréter visuellement les corrélations entre les différents variables, à l'aide du tableau de corrélation, on va utiliser deux méthodes d'analyse. L'Analyse en composantes principales (ACP) une méthode d'analyse descriptive permettant de synthétiser l'information la plus pertinente des données utilisées et la Classification Hiérarchique (CH), permettra, quant à elle, de quantifier l'effet de ces facteurs en hiérarchisant les différents bassins versants. En croisant les différents résultats, nous allons essayer de dégager une carte de vulnérabilité multifactorielle à l'envasement des lacs collinaires et d'expliquer les raisons de tels assemblages.

3.1 ANALYSE ET INTERPRÉTATION DE LA MATRICE DE CORRÉLATION

Ce type d'analyse permet d'identifier simultanément les relations qui existent entre les variables, par une visualisation globale de ces corrélations en même temps. Ceci représente une bonne approche permettant d'affiner l'analyse du problème de l'érosion.

Les paramètres, géomorphologiques, anthropiques et hydro-climatiques des bassins versants intervenant dans la variabilité de l'écoulement et l'érosion, sont susceptibles d'expliquer l'envasement des retenues des différents individus étudiés. Toutefois, le nombre élevé de ces variables peut rendre l'étude pénible. Dans ce contexte, la matrice de corrélation, étant une étape primordiale dans la prise de connaissance des données, mettra en évidence les couples de variables explicatives les plus structurées et pourra soutenir, par la suite, le choix des différents paramètres pertinents qui vont être utilisés lors de la construction ultérieure des composantes principales.

Cette matrice de corrélation peut maintenir le choix des différents paramètres que nous allons utiliser pour sentir les relations entre les différentes variables explicatives.

Le choix définitif des paramètres s'est reposé sur les relations existantes entre les variables explicatives et le variable expliqué (Te) montrant une bonne corrélation (C_s ≥ 0,2). En plus, de chaque catégorie de paramètres, on choisit au plus deux paramètres qui présentent les plus forts seuils de signification avec le variable expliqué.

Un total de 15 variables (14 régresseurs (variables explicatives) et un variable régressant (variable expliqué : Te) a été sélectionné pour construire la matrice de la corrélation de base pour la présente étude (tableau 2).

D'après le test statistique de Pearson pour une erreur de première espèce égale à 5%, le seuil significatif est égal à 0,2. Cela cède alors à la matrice de corrélation une distribution considérablement modérée ayant 169 liens considérables sur un total de 225; ce qui correspond à 75% de la taille de la matrice totale.

Le tableau 2 résume les valeurs de corrélation existantes entre ces couples de variables. Il est à remarquer que les facteurs explicatifs influençant l'envasement ne sont pas tous positifs par leurs effets.

Tableau 2. Matrice de corrélation de toutes les variables explicatives retenues

Variables	Aire	Hmax	Pinter	Qmax	Lr	Ce	C/A	I30	Ic	Ig	% S cult	% arb-For	%ma-Ar	% CES	Te
Aire	1														
Hmax	0,236	1													
Pinter	-0,229	-0,164	1												
Qmax	0,256	0,596	0,021	1											
Lr	-0,180	-0,001	0,593	0,264	1										
Ce	-0,148	0,123	0,338	0,352	0,938	1									
C/A	0,164	-0,400	-0,296	-0,284	-0,366	-0,422	1								
I30	-0,116	0,186	0,172	0,410	0,483	0,567	-0,326	1							
Ic	0,080	-0,045	-0,072	0,029	0,206	0,322	-0,057	0,135	1						
Ig	-0,373	0,455	0,179	0,174	0,146	0,179	-0,443	0,267	-0,208	1					
% S cultiv	0,055	-0,069	0,127	0,285	0,018	-0,103	0,332	0,033	-0,369	-0,109	1				
% arb-For	0,103	-0,157	0,019	-0,018	0,404	0,460	-0,245	0,363	0,067	-0,115	-0,169	1			
%ma-Ar	-0,136	0,001	-0,126	0,186	0,097	0,153	-0,072	0,329	-0,145	-0,012	0,106	0,246	1		
% CES	0,513	0,005	-0,282	-0,307	-0,249	-0,147	-0,053	-0,245	0,231	-0,181	-0,501	0,145	-0,127	1	
Te	-0,374	0,051	0,024	0,250	0,532	0,660	-0,356	0,525	0,252	0,408	-0,051	0,210	0,288	-0,274	1

Le taux d'envasement et la profondeur de la lame ruisselée sont inversement corrélés à la surface et le taux d'aménagement CES du bassin versant avec des coefficients respectifs de

(-0,374) et (-0,274). C'est le cas typique du bassin versant El Gouazine (n°16) caractérisé par la plus grande surface.

On note que le bassin versant d'El Gouazine ayant une superficie 5 fois supérieure à la moyenne, il s'est avéré plus raisonnable de le mettre en individus passifs (supplémentaire) dans notre ACP.

En effet, plus le relief correspond à une topographie prononcée, moins est marqué le chevelu hydrographique, et donc plus le potentiel érosif ainsi que la quantité du transport solide diffusée sont importants, ce qui justifie, par la suite, la source majeure du processus de l'envasement [6]. Le taux d'envasement est inversement corrélé aux variables anthropiques (travaux de conservation des eaux et des sols CES) et à la couverture végétale (% S cult). C'est-à-dire quand le bassin versant est aménagé par des travaux de conservation des eaux et des sols (banquettes, seuils hydrauliques,...) ou assez occupé par une couverture végétale relativement dense, la rétention des eaux de ruissèlement ainsi que la charge solide transportée sera importante. Les travaux CES ainsi que l'occupation du sol jouent aussi un rôle important à la réduction de vitesse de ruissèlement ce qui rend moindre l'effet de l'érosion.

Plus la pente du terrain est forte plus l'effet de l'érosion devient important et par conséquent un taux d'envasement important à l'aval du bassin (dans le lac collinaire). Ceci explique les coefficients de corrélation positifs (0,408) entre l'indice de pente global (Ig) et le taux d'envasement (Te).

Les paramètres hydrologiques (Ce, Lr et I30) s'aperçoivent bien corrélées positivement au potentiel érosif avec des coefficients respectifs de (0,660), (0,532) et (0,525) d'où à la dégradation. Ceci montre que ces paramètres imposent

ensemble une influence plus importante sur l'évolution hydrologique, qui peut être soit régulateur ou accélérateur de l'érosion.

On remarque de plus l'absence de corrélation entre les pluies interannuelles d'une part, et l'altitude maximale, d'autre part, avec l'envasement spécifique. Ceci reflète, en fait, une caractéristique principale de la zone semi-aride qui pourrait être due à la variabilité spatiale du total des pluies et de leurs intensités agressives correspondantes sur toutes les échelles. Dès lors, ces deux paramètres ne peuvent pas, à eux seuls, expliquer l'importance de l'érosion. Quant aux facteurs géomorphologiques, ils découlent de la lithologie qui résume les autres caractères des bassins, étant donné que la nature lithologique des substrats est un des facteurs les plus importants dans le processus de l'érosion hydrique et de l'envasement.

3.2 CARACTÉRISATION DE L'ENVASEMENT BASÉ SUR L'ACP

On applique l'analyse en composantes principales (ACP), à ce stade, sur les variables adoptées dans le tableau 2 pour reconnaître les principaux facteurs qui conditionnent la variabilité de processus érosif ainsi que l'envasement des retenues collinaires. L'analyse a été appliquée par le biais du logiciel statistique XLSTAT (2013) pour 216 observations issues de 26 individus (lacs collinaires) et 15 variables.

Le tableau 3 donne le pourcentage de variance expliquée ainsi que celui de la variance cumulée par chaque axe factoriel responsable de la distribution du taux d'envasement des retenues des lacs collinaires. On a obtenu 15 axes en global représentons la distribution des variables et des individus par rapport à eux. Les cinq premiers axes représentent ensemble un poids de 75% de la variance totale. Les contributions de la première, deuxième et troisième composante (CP) à la variance totale sont 28%, 14% et 13%, respectivement. Cependant, celle de la quatrième et la cinquième composante est relativement basse. Par conséquent, seuls les trois premiers sont considérés pour expliquer les aspects ainsi que les caractéristiques de la variabilité géographique du phénomène de l'alluvionnement.

Tableau 3. Les valeurs propres des axes de l'analyse en composantes principale

Composante	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Valeur propre	4,142	2,165	1,959	1,642	1,344
Variabilité (%)	27,614	14,433	13,061	10,945	8,963
% cumulé	27,614	42,047	55,108	66,054	75,017

Il est judicieux de souligner le fait que l'intensité maximale des événements pluvieux enregistrée en 30 minutes, caractéristique principale des zones semi-arides [3], affecte la génération du ruissellement ainsi que les processus érosifs. Ceci est considéré aussi comme un contribuant à la perte du sol à long terme, amplifié par l'hétérogénéité considérable de la nature des sols fragiles et le couvert végétal qui est peu développé ou parfois non existant.

* Sans être vraiment significatives par leurs coefficients de corrélation, les relations entre les variables d'occupation des sols et variables à expliquer montrent que les bassins forestiers ont une tendance à une érosion modérée, tandis que les bassins agricoles sont plus susceptibles à l'érosion. Les surfaces concernées par les travaux de CES n'étant pas à jour dans la banque de données à notre disposition nous n'avons pas pu affiner ce résultat.

Le tableau 2 fait ressortir que le rapport de la capacité initiale à l'apport liquide interannuel (C/A) est très dépendant des caractéristiques du ruissellement et de l'envasement. Cette constatation peut traduire l'influence de ces paramètres sur le taux de remplissage et la rentabilité des ouvrages hydrauliques. En effet, plus la retenue du lac est petite comparée à la taille de son bassin versant, plus la longévité de l'ouvrage est menacée par le risque alluvionnaire.

A la lumière de cette étude descriptive visuelle, il est assez difficile de séparer les effets des facteurs gouvernant la variabilité de l'envasement dans la zone d'étude. De plus, il se dégage que la variabilité de l'ablation des petits bassins versants de la Dorsale Tunisienne et du Cap Bon est un phénomène aussi complexe qui ne peut être décrit que moyennant la combinaison de plusieurs critères biophysiques, hydro-climatiques et anthropiques. Néanmoins, cette caractérisation reste encore grossière. Pour mieux raffiner l'étude cartographique ainsi que des facteurs conditionnels de la variation de l'envasement, le recours à une statistique paramétrique complémentaire s'avère alors une nécessité.

3.2.1 REPRESENTATION DES VARIABLES SUR LES AXES DE L'A.C.P

3.2.1.1 REPRESENTATION DES VARIABLES SUR LE PLAN (F1*F2)

La figure 2, illustre la distribution des variables sur le premier plan factoriel formé par les axes F1 et F2. Cette figure montre que le premier axe F1, qui présente 28% de la variance totale, met en évidence une opposition entre les variables relatives à la superficie des bassins versants (S) et les travaux de conservation des eaux et des sols (CES) d'une part, et les paramètres de l'envasement (Te) et les paramètres hydrologiques (Ce, Lr et I30) ainsi que la couverture végétale (ar-for) , d'autre part. En effet, le taux d'envasement est plus faible au niveau d'un bassin versant avec une surface importante et concernée par les travaux de CES. En fait, plus la pente est élevée, moins l'espace est occupé et ménagé. En outre, la présence d'arbres ou de forêt et des interventions CES, tend à réduire le potentiel érosif de l'écoulement et par conséquent la quantité de sédiments délivrés.

Cette représentation, montre aussi que les paramètres hydrologiques (I30, et Lr), le relief (Ig, Hmax) et la structure du sol (% ma-ar) sont bien corrélés au taux d'envasement (Te). Ceci implique que les précipitations intensives aggravent le processus d'alluvionnement dans un bassin à relief accentué et des sols très marneux. Par conséquent, le taux d'envasement au niveau des retenues collinaires est très important. Le comportement du paramètre caractérisant l'occupation du sol (% arb-for) vis-à-vis le taux d'envasement (Te) confirme que l'érosion est très importante sur un sol moins occupé et moins.

Cet axe se matérialise par l'effet de la lithologie du sol (ma-ar) qui évolue inversement à la dégradation spécifique. Cet axe caractérise ainsi l'impact de l'érodabilité des sols. Ce résultat suggère que la lithologie, définie par une proportion importante en marne et argile, a un effet remarquable sur la variabilité de l'envasement dans la zone d'étude et délivre les taux d'ablation les plus élevés. Ce constat s'accorde avec de nombreuses études antérieures élaborées dans les régions méditerranéennes semi-arides [7], [8], [9] et [10]. En effet, les bassins versants formés de roches meubles et peu résistantes sont généralement des sols peu profonds et mal développés.

Par conséquent, le relief géologique récent couplé au taux d'érosion, réduit la maturité de ces sols. Par la suite, il s'avère que c'est la dégradation des sols qui dépeint la Dorsale où elle entraîne de sérieux problèmes d'érosion hydrique [11]. En fait, ces sols dégradés ont souvent un couvert végétal peu épais et irrégulier. Les mécanismes érosifs et les dépôts sédimentaires y sont spectaculaires, surtout lors des crues exceptionnelles.

L'axe F1 individualise l'intensité de pluie maximale enregistrée en 30 minutes (I30) et la profondeur de la lame écoulée (Lr) ainsi que le coefficient d'écoulement (Ce) qui sont étroitement liés entre eux et qui s'opposent au rapport de la capacité initiale du barrage à l'apport d'eau interannuel (C/A). Cet axe caractérise alors l'impact de l'agressivité des pluies et sa conséquence sur l'effet et le taux d'envasement des lacs collinaires. En fait, en Tunisie Centrale semi-aride, et bien que les intensités de pluie exceptionnelles de 15 minutes de durées paraissent être, récemment, plus homogènes [11], les intensités de 30 minutes ont été souvent prétendues être la cause essentielle de l'érosion [12] et [13]. Ces intensités torrentielles, se produisent essentiellement en automne et au printemps, se localisent sur les hauteurs et vers la région centrale, là où la pluviosité se trouve encore relativement forte et se double sous l'effet de la continentalité [1].

Le ruissellement généré par les averses sporadiques, communément connues par les "crues éclairs", caractéristiques des régions semi-arides [14], assure le transfert et la décantation des matières fines en suspension au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'aval d'un versant, engendrant dès lors l'amputation des infrastructures hydrauliques et la minimisation de leurs longévités. Dans ce contexte, de nombreuses retenues ont été totalement colmatées dans moins de 10 ans après leur construction. C'est particulièrement le cas du lac Saadine (n°22), au cœur de la Dorsale, qui s'est totalement envasé suite à deux averses enregistrées en août et septembre 1995 [15].

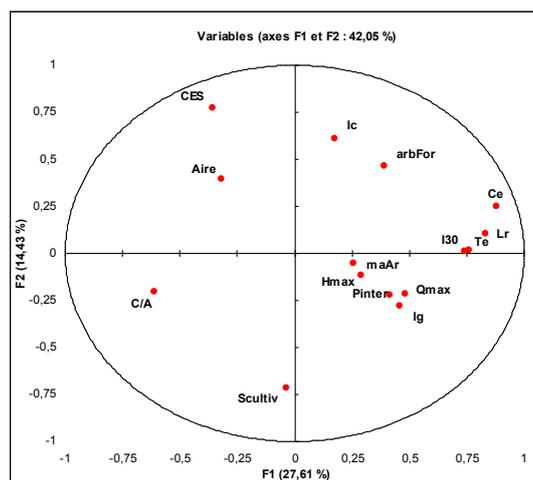


Fig. 2. Représentation des variables sur les axes 1 et 2 de l'ACP

L'axe F2 individualise également l'indice de compacité de Gravius (Ic) qui est bien prononcé, présentant alors l'effet de la forme des bassins. En effet, outre la topographie et la couverture végétale, la forme du bassin versant se révèle parmi les principaux facteurs qui contrôlent l'érosion spécifique annuelle [16], [9] et [17]. En fait, plus les bassins sont allongés, plus leurs temps de concentration sont compensés par des pentes plus escarpées, moins l'effet réducteur de la sédimentation est observé.

De plus, l'axe F2 individualise l'effet de la couverture végétale et forestière ainsi que la présence des interventions CES (Tableau 3). Alors, plus est aménagé et bien occupé, le bassin versant, plus l'effet érosif est faible. D'après [18], l'absence d'un couvert végétal permanent, au lieu de stagner et de s'infiltrer, les eaux se sont mises à ruisseler et à entraîner avec elles la terre et ses fertilisants naturels, en particulier le limon, l'argile et les matières organiques qui sont également des liants des sols fragiles.

3.2.1.2 REPRESENTATION DES VARIABLES SUR LE PLAN (F1*F3)

L'axe F3 est principalement associé aux caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant (Ig et Hmax) ainsi que l'intensité maximale de pluie en 30 minutes (I30) et le débit de pointe (Qmax). Cet axe caractérise l'impact de l'agressivité des pluies engendrant des crues exceptionnelles (Tableau 4). L'axe oppose les altitudes maxima (Hmax) au taux d'envasement (Te) tandis que la pluie interannuelle (Pinter), la lame ruisselée (Lr) et le coefficient d'écoulement (Ce) évoluent selon le gradient du taux d'envasement. Les fortes intensités de courtes durées sont le propre du début d'orages violents et courts, des régions les plus arides (région de Thala) et les plus hautes où l'érosion reste faible par rapport à des régions plus arrosées. En effet les bassins d'altitudes sont aussi ceux qui ont le moins de sol et où les affleurements rocheux délivrent le moins de matériaux. A l'inverse les pluies de fortes intensités et de longues durées engendrent de fortes crues lesquelles produisent beaucoup de particules à l'exutoire d'un bassin versant. De plus cette aptitude à l'érosion peut être accentuée, lorsque le bassin présente un fort relief. L'axe F3 oppose les variables d'occupation du sol (Arb-For) au débit de pointe, ces deux paramètres exercent deux rôles antagonistes sur l'érosion. Tandis que la présence d'arbres ou de forêt a tendance à freiner l'érosion (fig. 3).

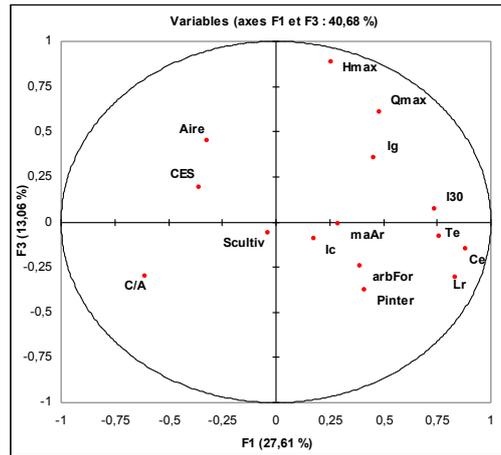


Fig. 3. Représentation des variables sur les axes 1 et 3 de l'ACP

Les répartitions des variables sur les axes de l'ACP à savoir que l'indice de pente, le coefficient d'écoulement et le taux d'envasement sont étroitement liée et évoluent dans le même sens. Ces résultats montre qu' hors mis la forme du relief du bassin et l'écoulement, la superficie tient un rôle important dans la variabilité du taux d'envasement 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.

Tableau 4. Contributions des variables retenues pour la construction des axes de l'ACP

	F1	F2	F3
Aire	2,458	7,217	10,363
Hmax	1,605	0,114	40,365
Pinter	4,109	2,210	7,289
Qmax	5,567	2,154	19,049
Lr	16,742	0,533	4,769
Ce	18,713	2,924	1,094
C/A	9,051	1,951	4,588
I30	13,189	0,006	0,255
Ic	0,733	17,308	0,400
Ig	5,032	3,626	6,508
Scultiv	0,029	23,564	0,176
Arb-For	3,697	10,000	2,976
ma-Ar	2,028	0,655	0,005
CES	3,091	27,724	1,849
Te	13,957	0,014	0,313

3.2.2 REPRESENTATION DES INDIVIDUS SUR LES AXES DE L'ACP (F1*F2)

3.2.2.1 REPRESENTATION DES INDIVIDUS SUR LE PLAN (F1*F2)

La figure 4 montre la représentation des individus sur le plan factoriel formé par les deux axes F1 et F2 de l'ACP. Cette figure nous permet de distinguer entre 3 principaux groupes. La différenciation entre ces trois groupes est basée sur l'effet de la fluctuation des facteurs naturels (couverture végétale, nature du sol) et anthropiques (CES) qu'individualise l'axe F2.

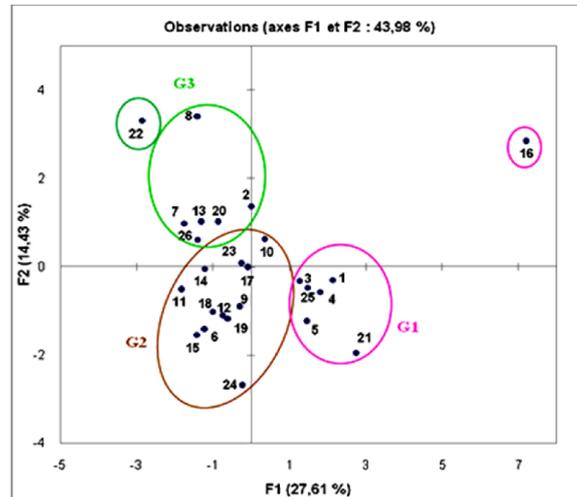


Fig. 4. Représentation des individus sur les axes de l'ACP (F1*F2)

Groupe I : Le premier groupe montrant des faibles taux d'envasement ($Ta < 9$ tonnes/ha/an) réunit les lacs suivants: Abdeladim (n°1), Mrira (n°3), Echar (n°4), Bouajer (n°5), el Gouazine (n°16), Zayet (n°21) et Ességhir (n°25).

Le bassin versant El Gouazine appartenant aussi à ce premier groupe, mais il se place plus éloigné que les autres bassins, dans la représentation graphique. Ce bassin se caractérise par un relief modéré ($Ds = 75$ m), sols marneux (% ma-ar = 56) et une importante couverture végétale et forestière. En plus, il montre une faible valeur d'Intégral Hypsométrique ($IH = 0,15$) indiquant la densité de son réseau hydrographique. Malgré qu'il soit exposé à des précipitations relativement intenses ($I30 = 60$ mm/h) ce bassin montre, comme tous les autres bassins de groupe I, un faible taux d'envasement. Ceci peut être dû à des pratiques de conservations des sols qu'occupent environ 70% de la superficie du bassin versant El Gouazine.

Les bassins versants Abdeladhim (n°1), Mrira (n°3), Echar (n°4) et Bouajer (n°5) se localisent au Sud-Ouest de la Dorsale tunisienne. Ces bassins se caractérisent par des superficies importantes, des précipitations rares érosives, des réseaux hydrographiques relativement longs et hiérarchisés. Ce qui conduit à un faible effet de l'érosion au niveau de ces sites. Les deux bassins versants Zayet (n°21), à l'extrémité Sud-Est de la Dorsale, et Es Séghir (n°25), situé à l'Est du Cap Bon, sont aussi classifiés au niveau de ce premier groupe. Malgré qu'ils soient spatialement plus éloignés ces deux bassins ont les mêmes caractéristiques que les autres bassins du groupe (surface importante et faible taux d'envasement). Le bassin versant Zayet (n°21) se caractérise par un plus faible Intégral Hypsométrique ($IH = 0,08$) conduisant à une faible intensité d'érosion. Strahler (1952) a montré que HI est corrélé négativement avec la densité de drainage du bassin versant. Lorsque HI est faible, le réseau hydrographique est bien développé et les pentes sont douces, d'où l'effet érosif devient plus faible.

Ce premier groupe correspond à des bassins versants circonscrits généralement en bordure des synclinaux ou bien au niveau des plaines, ayant des superficies relativement importantes et des formations géologiques moyennement dures ou tendres (40 % < marnes et argiles < 60%) moyennement perméables à imperméables (à l'exception du bassin Ességhir, dont les roches sont meubles et perméables) réduisant considérablement l'effet de l'écoulement et du ruissellement ($Ce_{moy} < 5\%$, $Lr_{moy} < 15$ mm, $I30_{moy} > 25$ mm/h). En effet, l'érosion par ravinement et celle en nappe, relatives à ces bassins versants, sont considérées faibles. Le comportement est expliqué par des reliefs faibles à modérés ($25 < Ig < 50$ m/km), des forêts dominantes (El Gouazine, Es Séghir et Abdeladhim, Baouejjer) ou des terres très cultivés (M'Rira, Abdeladhim, Essghir) ainsi que par un écoulement faible avec peu de crues exceptionnelles. Ce groupe concerne essentiellement les bassins les plus protégés contre les pluies érosives de diverses manières surtout par les pratiques d'aménagement CES (taux d'aménagement entre 25

et 75%). Dans ce contexte, le bassin versant d'El Gouzine montre l'efficacité des aménagements anti-érosifs mécaniques, et ce depuis 1996.

Groupe II : Ce groupe, définie par un envasement modéré à fort ($9 < Ta < 23.7$ tonnes/ha/an), comporte les bassins versants El Amdi (n°6), Es Sénégal (n°9), Brahim Zaher (n°10), Abdessadok (n°11), Hadada (n°12), Jannet (n°13), El Hnach (n°14), Mrichet el Anze (n°15), Dékékira (n°17), Fidh Ali (n°18), Fidh ben Nasr (n°19), Sbahia (n°23) et El Maleh (n°24). Tous ces bassins se localisent dans la partie la plus occidentale des montagnes de la Dorsale tunisienne, sauf le bassin Sbahia (n°23) se situent au Cap Bon. En global, les bassins versants de ce groupe se caractérisent par un relief fort ($138 \text{ m} < D_s < 248 \text{ m}$), des fréquentes précipitations érosifs ($38 \text{ mm/h} < I_{30} < 252 \text{ mm/h}$) et une couverture végétale et forestière clairsemée. Ceci explique les forts taux d'envasement (allant jusqu'au 23 t/ha/an) montrés par ces bassins. En outre, les deux facteurs pourcentage des surfaces occupées par des parcours et pourcentage des marnes-argiles dans les sols ($50 < \% \text{ma-ar} < 95$) aggravent la situation. Malgré le bon degré d'aménagement de ces bassins mais ces caractéristiques conduisent à un état érosif très alarmante. Les valeurs plus élevées d'IH pour les bassins versants de ce groupe (0,31 à 0,86) conduisent aussi à un état très érodables.

Les bassins (Sbahia (n°23), Abdessadok (n°11), El Hanach (n°14) et Fidh ben Nasr (n°19)), sis sur les contreforts des massifs montagneux de la Dorsale, se dépeignent surtout par leur relief très accidenté à pentes abruptes ($75 < I_g < 100 \text{ m/km}$) et un paysage très morcelé. Ce comportement engendre un effet d'écoulement modéré ($C_{e_{\text{moy}}} > 10\%$, $L_{r_{\text{moy}}} > 30 \text{ mm}$, $I_{30_{\text{moy}}} > 90 \text{ mm/h}$), suite au rôle joué par les sols jeunes évolués sur des matériaux encore en formation alluvionnaire. En fait, ces bassins de forme peu allongée se caractérisent par un réseau hydrographique peu développé qui entaille des formations géologiques moyennement dures ou tendres peu perméables à quasi imperméables ($40 < \text{marnes ou argiles} < 60\%$) et ($40 < \text{calcaires ou grés} < 60\%$). Ces conditions favorisent l'amplitude de l'érosion ravinante et en nappe qui est prononcée surtout au niveau des bassins sur marnes gypseuses fortement défrichés.

Groupe III : Le troisième groupe, définie par un envasement modéré ($9 < Ta < 16.3$ tonnes/ha/an), dépassant la limite permmissible de pertes en terres, correspond aux lacs Sadine 1 (n°7) et Saadine (22). Ce groupe comporte les bassins versants suivants : Arara (n°2), Sadine 1 (n°7), Sadine 2 (n°8), Janet (n°13), El Moudhi (n°20), Sadine (n°22) et Kamech (n°26).

Les bassins de ce groupe sont caractérisés par un relief modéré ($33 \text{ m} < D_s < 92 \text{ m}$), une couverture végétale et forestière moins importante avec un faible degré d'aménagement. En plus, les bassins de ce groupe sont formés par des sols moyennement à fortement marneux ($30 < \% \text{ma-ar} < 90$). En plus, des taux d'envasement modérés engendrés par la prédominance des événements pluvieux intenses et irréguliers. Ces bassins montrent aussi des valeurs d'IH relativement fortes, ce qui indique leur sensibilité à l'érosion.

Le bassin versant Arara (n°2), se localise au SW de la Dorsale, présente un taux d'envasement relativement faible par rapport aux autres bassins de ce groupe. En outre, par l'effet de relief et l'effet du pourcentage des marnes-argiles dans les sols, ce faible taux de colmatage peut être dû à des pratiques de conservations des sols qu'occupent environ 56% de la superficie du bassin versant Arara.

Cependant le bassin Saadine (n°22), se situe au Cap Bon, présente un taux d'envasement fort par rapport aux autres bassins de ce groupe. Le lac Saadine a été entièrement comblé avec un volume de sédiments de $44\,500 \text{ m}^3$ provenant de deux inondations en Août et Septembre 1995.

3.2.2.2 REPRESENTATION DES INDIVIDUS SUR LE PLAN (F1*F3)

La représentation des individus sur le plan factoriel formé par les axes F1 et F3 permet de distinguer entre trois groupes de caractéristiques différentes (Fig. 5). La différenciation entre ces trois groupes est basée sur l'impact de l'agressivité des pluies engendrant des crues exceptionnelles qu'individualise l'axe F3. On analyse alors :

Groupe I : Ce clan coïncide au premier groupe traité dans la représentation précédente. Ce groupe comporte les bassins versants qui montrent un taux d'envasement plus faible indiquant une faible intensité érosive. Ces bassins se caractérisent par des sols marneux. Mais, la présence d'une couverture végétale et forestière assez dense ainsi qu'une intervention CES assez importante conduisent à une faible intensité d'érosion ;

Groupe II : Ce groupe comporte les bassins versants souvent classifiés dans le troisième groupe, caractérisé par une forte érosion, au niveau de la première représentation graphique sur le plan (F1*F2). Cette inversion d'emplacement s'explique par le fait que la représentation (F1*F2) se base sur l'effet des facteurs naturels et anthropiques. Ce groupe renferme donc les bassins versants caractérisées par une couverture forestière clairsemée, une intervention d'aménagement faible à moyenne et des sols assez marneux.

Ce clan issu de la représentation des individus sur les axes de l'ACP (F1*F3) dont le taux d'envasement est le plus fort ($T_a > 23.7$ tonnes/ha/an) regroupe les lacs collinaires suivants : El Amdi (n°6), Sadine 2 (n°8), Janet (n°13), Mrichet el Anze (n°15), Dékékira (n°17), Fidh Ali (n°18), Fidh ben Nasr (n°19), El Moudhi (n°20), Sadine (n°22), El Maleh (n°24) et Kamech (n°26), tenant place au niveau des anticlinaux des jebels. Le comportement de ces bassins versants s'explique par le rôle joué par l'écoulement ($Ce_{moy} > 15\%$) et le ruissellement important des crues ($Lr_{moy} > 80$ mm) favorisés par l'intensité érosive des précipitations enregistrées en 30 minutes ($I_{30_{moy}} > 200$ mm/h). Ce comportement dépend aussi d'un relief fort ($50 < I_g < 100$ m/km), d'une assise géologique tendre et imperméable très vulnérable à l'érosion, de la forme allongée de leurs bassins et d'un chevelu hydrographique plus ou moins dense. En effet, l'érosion en nappe observée au niveau de ces bassins est généralement moyenne et parfois très prononcée. Elle s'explique en partie par la présence de sols d'érosion squelettique dont la macroporosité, la cohésion et la consistance sont très faibles et vraisemblablement dues à la présence d'argiles gonflantes, des pourcentages de marnes supérieures à plus de 80% et des encroûtements calcaires où affleurent des matériaux indurés.

Ce groupe est marqué par un taux d'aménagement CES inférieur à 25 %: ce qui amplifie d'avantage l'aptitude érosive et affaiblit le rôle joué par l'occupation du sol. En fait, les bassins versants sont soit très cultivés (terres agricoles > 60 %) en pente et leur dégradation rend très difficile la régénération de la végétation naturelle défrichée (pour Kamech et Janet); soit peu cultivés où les reliques de végétations naturelles sont riches lorsqu'elles sont épargnées par le surpâturage et surtout les labours en pente, pour Fidh Ali, Dékékira et Arara.

Groupe III : Ce groupe renferme les bassins versants classifiés dans le deuxième groupe selon la première représentation (Fig.5). Ces bassins versants se caractérisent par une érosion moyenne une couverture relativement dense, des sols très marneux et une intervention CES moyenne.

Ces bassins constituant le pôle moyennement pluvieux de la zone d'étude (l'occurrence des crues est très rare), génèrent un taux de remplissage fort à moyen ($Ce_{moy} > 10\%$, $Lr_{moy} > 25$ mm, $I_{30_{moy}} > 80$ mm/h). Ces bassins se dépeignent aussi, d'une topographie formée des collines modérées peu accentuées, par une surface de drainage moyenne (de l'ordre de 3 km²), un réseau hydrographique bien hiérarchisé drainant des roches tendres et imperméables et ayant une faible couverture végétale (inférieure à 11 %) à l'exception du lac Brahim Zaher qui présente une partie forestière importante.

Du fait de la continentalité, la quasi-totalité des bassins faisant partie de ce groupe présente un couvert végétal variable très précaire et constamment menacé par l'érosion provoquée par le défrichement et les labours (soit terres à vocation forestière ou bien des espaces moyennement cultivés et sous parcours (comme c'est le cas des lacs Sbaihia (n°23) et El Hnach (n°14), respectivement)), et un pourcentage d'aménagement moyen ou inexistant engendrant l'augmentation du phénomène abrasif des retenues des lacs collinaires.

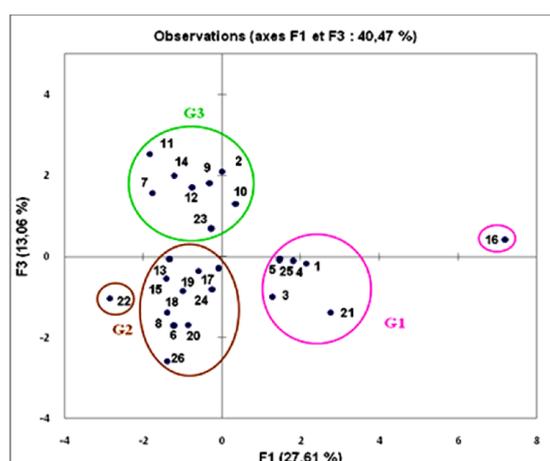


Fig. 5. Représentation des individus sur les axes de l'ACP (F1*F3).

La comparaison entre les deux représentations, visualisant la projection des valeurs propres des individus sur les axes de l'ACP (F1*F2) et (F1*F3) qu'ils prennent en fonction de la variable filtre, met en relief la mobilité de quelques bassins versants de part et d'autre du deuxième et du troisième groupe. Ce nouveau clan est bradé par le lac collinaire Sadine (n°22) qui se caractérise, en plus de sa pente raide ($I_g > 100$ m/km), par le taux d'envasement le plus alarmant dans la zone d'étude ((Te) dépassant 31 tonnes/ha/an). L'aptitude abrasive du lac Sadine est d'autant plus accrue par la susceptibilité des sols marneux

à l'érosion. En effet, ces sols subissent les événements pluvieux paroxysmiques les plus importants ayant les intensités des pluies de 30 minutes les plus élevées (un maximum enregistré lors de la période 1994-2006 égale à 250 mm/h). Ces averses torrentielles fortement érosives, ruissellent sur un bassin versant fortement cultivé et non aménagé générant, par conséquent, des quantités éminentes de sédiments se déposant au fond de la retenue du lac et conduisant à son colmatage anticipé.

3.3 CARACTERISATION DE L'ENVASEMENT BASE SUR L'ARBRE HIERARCHIQUE

La procédure de l'arbre hiérarchique (dendrogramme de la figure 6) est un outil approprié pour montrer les résultats obtenus par une classification ascendante hiérarchique [19]. Ce dendrogramme permet de décrire de façon explicite la structure finale de la classification obtenue: «plus les individus se regroupent dans l'arbre, plus ils se ressemblent». L'objectif fondamental consiste à définir des groupements stables et homogènes de lacs collinaires suivis tout en associant les éléments semblables.

Chaque niveau de hiérarchie représente une classe [20]. 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 nœud représente une classe qui se décompose elle-même en 2 sous classes, l'aînée et la benjamine, d'après les distances euclidiennes qui les séparent.

La classification hiérarchique est appliquée sur 26 lacs collinaires de la Tunisie Centrale en fonction des 7 variables hydro-morphométriques suivantes relevant de la physiographie des bassins versants: l'indice de pente global (I_g), l'indice de compacité (I_c), la longueur du talweg (L_{tw}), la nature de ruissellement et d'écoulement (C_e, L_r) et d'érosivité des pluies (I₃₀) ainsi que le taux d'abrasion (T_a) en tant que variable dépendante.

De première vue, il ressort de la figure ci-après que la taxinomie développée est pratiquement compatible avec celle éditée par l'analyse des différentes méthodes (matrice de corrélation et ACP). Par ailleurs, une aptitude croissante et contradictoire de la dynamique de l'envasement des retenues des lacs collinaires est observée allant de la classe (1) à (3), du faible au fort potentiel d'abrasion. La typologie ainsi dévoilée plaide en faveur de l'identification de trois classes de lacs collinaires. En effet, le lac collinaire El Gouazine (n°16) qui dépeigne de la plus grande surface de drainage et le plus faible taux d'abrasion. Contrairement le lac collinaire Dékikira (n°17) se caractérisant par un bassin versant dont la forme est la plus allongée qui permet la coalescence des filets d'eau et la formation de rigoles accentuant l'ablation de terre. De plus le lac collinaire Sadine (n°22) peut désigner le cœur ou le noyau central duquel est régie la variabilité spatiale du phénomène de l'envasement dans la zone d'étude.

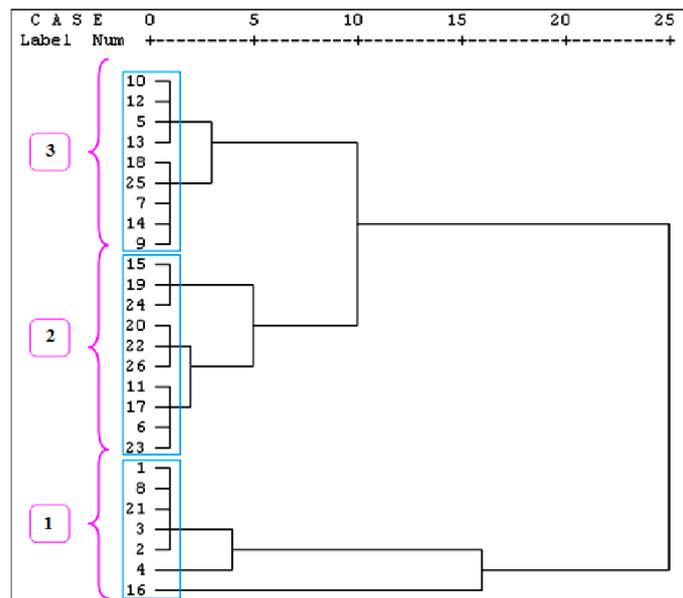


Fig. 6. Dendrogramme résultant de la classification hiérarchique des lacs collinaires suivis

- La classe I, qui englobe les lacs collinaires suivants (1, 8, 21, 3, 2, 4 et 16) se caractérise par un faible taux d'envasement, un relief faible et un ruissellement peu intense.
- La classe II, réunissant les lacs collinaires suivants (15, 19, 24, 20, 22, 26, 11, 17, 6 et 23) dont le taux de sédimentation est fort, est relative aux bassins versants à potentiel abrasif alarmant qui est dû aux coefficients d'écoulement élevés liés surtout aux plus fortes intensités pluviométriques érosives couplées à une topographie modérée ou forte.
- La classe III comporte les lacs collinaires suivants (10, 12, 5, 13, 18, 25, 7, 14 et 9) dont le taux de sédimentation est modéré à fort. Ce caractère est régi par une hydrodynamique intense aggravée surtout par les pentes escarpées des bassins versants.

3.4 ELABORATION D'UNE CARTOGRAPHIE DES ZONES À RISQUES ALLUVIONNAIRES

La superposition des résultats issus de la CH et de l'ACP a dévoilé la possibilité d'élaborer une carte de vulnérabilité spatiale de la dynamique de l'envasement, et ce à grande échelle. La répercussion d'une telle approche est la perception des zones ayant un faible ou fort risque face au fléau de colmatage des retenues sises dans la Tunisie Centrale. Cette carte de la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement sera un outil indispensable dans une démarche de lutte contre l'érosion. Elle permet de disposer d'une vue d'ensemble des zones menacées et de localiser les secteurs nécessitant une intervention prioritaire dans une perspective de gestion durable des sols.

Les représentations graphiques issues de l'analyse en composantes principales et la classification hiérarchique ont permis de subdiviser les bassins étudiés en trois groupes (voir fig. 7) :

* un premier groupe le moins vulnérable au risque d'envasement se localise sur les confins méridionaux et orientaux Ouest de la Dorsale et aussi sur les plaines côtières. Ce groupe comporte les bassins versants suivants (1, 3, 4, 5, 21, 25 et 16), correspond aux bassins versants caractérisés par un faible taux d'envasement, une surface de drainage importante, un relief faible, réseau hydrographique relativement hiérarchisé et un effet de précipitation et de ruissellement peu intense. Cette classe est aussi faiblement affectée par les diverses formes d'érosion, en raison de la multiplication des travaux de conservation des eaux et des sols en association avec le couvert végétal continu qui contribuent à rabattre considérablement le taux d'abrasion de ces lacs.

Quant aux autres bassins moyennement aménagés, l'aptitude des sols à résister à l'érosion serait due à la présence sur les versants de bancs de roches calcaires dures sur des pentes plus ou moins prononcées, jouant ainsi un rôle anti-érosif.

* un deuxième groupe comporte les milieux les plus dégradés couvrent presque la totalité de la zone semi-aride de la Tunisie Centrale. Ce groupe comprend les bassins versants suivants (6, 8, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 24 et 26), relative aux bassins versants à potentiel abrasif très important, expliqué par des coefficients d'écoulement élevés liés surtout aux plus fortes intensités pluviométriques érosives associées avec une topographie modérée ou forte, une structure de sol plus marneuses et une surface de drainage non occupée et non aménagée. On en déduit, donc, que c'est cette classe qui déclenche la dynamique érosive et sédimentaire, et ce, en cédant d'importantes quantités de particules de sol pour se concentrer au niveau d'un noyau central spécifique de la Dorsale.

Le risque d'érosion des sols est également lié à un climat sub-humide et aux caractéristiques pluviométriques locales, avec des épisodes pluvieux exceptionnels ayant des intensités maximales en 30 minutes très élevées et érosives qui accentuent l'indice de vulnérabilité à l'érosion. Il s'agit, en fait, du mécanisme de l'érosion par ravinement dominant dans cette région qui est crucial pour l'envasement du réservoir.

* un troisième groupe s'étend de part et d'autre des flancs Nord et Sud de la Dorsale, comporte les bassins versants suivants (2, 7, 9, 10, 11, 12, 14 et 23), représentant les bassins versants caractérisés par un taux de sédimentation modéré à fort. Ce taux de sédimentation est gouverné par une structure plus ou moins marneuses des sols et une hydrodynamique intense aggravé par les pentes abruptes de ces bassins. D'autre part, l'évolution des états de surface soumise à l'action conjuguée des pratiques culturelles traditionnelles, des changements d'occupation du sol (culture mécanisée), des efforts d'entretien et de réhabilitation CES quasi-absents et d'un climat marqué par une forte variabilité du nord au sud (le Nord pour le rôle joué par la pluie et le Sud pour le rôle joué par l'évaporation), peuvent conditionner vigoureusement l'écoulement, l'infiltration, l'érosion et, par conséquent, la sédimentation.

En outre, les mécanismes érosifs et les dépôts sédimentaires sont spectaculaires dans ces régions surtout lors des crues exceptionnelles. En effet, ce sont les processus de ravinement généralisés qui se situent dans les secteurs de roches tendres, des formations superficielles non encroûtées et les sols dégradés peu développés avec une végétation peu épaisse et

irrégulière. On en déduit, donc, que c'est cette classe qui déclenche la dynamique érosive et sédimentaire, et ce, en cédant d'importantes quantités de particules de sol pour se concentrer au niveau d'un noyau central spécifique de la Dorsale. Dès lors, cette classe doit être prise comme zone prioritaire d'intervention pour lutter contre le fléau de colmatage.

La figure 7 dévoile que la région d'étude est divisée en trois groupes reflétant différentes caractéristiques hydro-climatiques et physiographiques. Les frontières des zones délimitées sont ajustées en tenant compte des caractéristiques géographiques et des isohyètes de la répartition spatiale des précipitations.

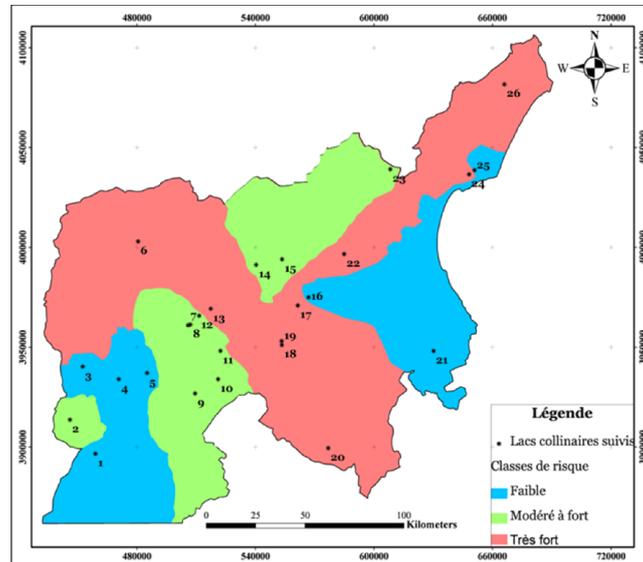


Fig. 7. Distribution spatiale du risque de vulnérabilité à l'envasement

4 CONCLUSION

La cartographie des zones à la vulnérabilité multifactorielle à l'envasement de la Tunisie Centrale a permis de distinguer trois classes : les zones à faible vulnérabilité (49,6 %) ; les zones à vulnérabilité moyenne (27,6 %) et les zones fortement vulnérables (22,8 %). A la lumière de ces analyses, il ressort que la zone d'étude s'est scindée en trois zones à différentes aptitudes au risque d'envasement. En effet, il s'est avéré que les milieux les plus dégradés couvrent presque la totalité de la zone semi-aride de la Tunisie Centrale et ce du fait de l'altitude des massifs montagneux, de la continentalité croissante vers l'Ouest, de l'augmentation de l'aridité vers le Sud et enfin de l'opposition de versants. Le milieu semi-aride est loin d'être un ensemble bioclimatique et géomorphologique homogène. C'est pour ces raisons que ces milieux présentent une aptitude érosive et abrasive plus prononcée.

L'approche cartographique décrite ci-dessus présente un outil puissant pour la connaissance spatiale de la vulnérabilité à l'envasement dans la zone d'étude. En fait, les constats précités sont cruciaux pour le développement d'une stratégie d'aménagement et de gestion des régions les plus frêles qui nécessitent une intervention diligente afin de réduire la vitesse érosive sévère, de minimiser le risque de la sédimentation des réservoirs, et par conséquent de renforcer leur longévité. Toutefois, la nature et la densité de ces aménagements doivent concilier la réduction du transport solide sans pour autant priver le lac de ces apports en eau par ruissellement.

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter mes sincères remerciements à M^{lle} Sahar Abidi, Mr Taoufik Hermassi, Mr Hamadi Habaieb et Mr M^{ed} raouf Mahjoub.

RÉFÉRENCES

- [1] I. Ayadi, *Caractérisation et modélisation de l'alluvionnement des retenues des lacs collinaires de la Dorsale Tunisienne et du Cap Bon : Approches statistiques et des réseaux de neurones*, Thèse de doctorat en Sciences Géologiques de la faculté des sciences de Sfax, 214 p, 2011.
- [2] O. Hajji, S. Abidi, H. Habaieb et M.R. Mahjoub, "Regionalization and contribution to the study of reservoirs sedimentation: Lakes of Cape Bon and the Tunisia Central", *11th International Conference on Hydrosience & Engineering "Hydro-Engineering for Environmental Challenges"*, Germany, Proceeding pp. 575-582, 2014.
- [3] Y. Zahar, *Eléments d'hydrologie pour l'aménagement. Modélisation spatiale et temporelle des précipitations extrêmes et érosives en Tunisie Centrale en vue de l'aménagement des petits bassins versants hydrologiques*. Thèse de doctorat, Université de Tunis I. Faculté des Lettres de la Manouba, 287 p, 1997.
- [4] M. Boufaroua, J.-M. Lamachère, A. Débabria et F. Ksibi, "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, Morocco, ISCO publications*, 13 p, 2006.
- [5] J. Albergel, S. Nasri et J. M. Lamachère, "Programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi-arides du pourtour méditerranéen", *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 17, n° 2, p. 133-151, 2004.
- [6] J. Poesen, J. Nachtergaele, G. Verstraeten and C. Valentin, "Gully erosion and environmental change: importance and research needs", *Catena*. 50, pp. 91–133, 2003.
- [7] A. Lahlou, " Modèles de prédiction de la sédimentation des retenues de barrages des pays du Grand Maghreb ", *Atelier International UNESCO-AISH-ENIT sur l'application des modèles mathématiques à l'évaluation des modifications de la qualité des eaux, Tunis*, pp. 312-324, 1990.
- [8] S. Phippen and E. Wohl, " An assessment of land use and other factors affecting sediment loads in the Rio Puerco watershed New Mexico ", *Geomorphology* 52, pp. 269– 287, 2003.
- [9] G. Verstraeten, J. Poesen, J. de Vente & X. Koninckx, "Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semi qualitative analysis using reservoir sedimentation rates " *Geomorphology*. 50, pp. 327–348, 2003.
- [10] A. Romero Díaz, JD. Ruiz Sinoga et F. Belmonte Serrato, " Hydric erosion rates in the region of Murcia ", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles N.º 56*, pp. 425-430, 2011.
- [11] S. Jebari, R. Berndetsson, M. Boufaroua et A. Bahri, "Exceptional Rainfall Characteristics Related to Erosion Risk in Semiarid Tunisia ", *The Open Hydrology Journal*, pp. 25-33, 2008.
- [12] Y. Zahar, A. Ghorbel & J. Albergel, "Impact of large dams on downstream flow conditions of rivers: Aggradation and reduction of the Medjerda channel capacity downstream of the Sidi Salem dam (Tunisia) ", *Journal Hydrology*, pp. 318-330, 2008.
- [13] M.R. Mahjoub, M. Bergaoui, M. Souissi et M. Boufaroua, " Régionalisation de l'envasement des lacs collinaires au niveau de la dorsale Tunisienne ", *Sud sciences et technologies No 7*, pp. 4-14, 2001.
- [14] A. Kawamura, A. Hentati. & H. Amaguchi, " Geomorphological Characterization of Small Hillside River Basins in Semiarid Region of Tunisia for Reducing Uncertainties in Water Resources Management", *International conference "Uncertainties in water resource management: causes; technologies and consequences" Mongolia*, pp. 63-69, 2008.
- [15] H. Camus, N. Guiguen & M. Ben Younes, " Note sur l'envasement de lacs collinaires en zone semi-aride Tunisienne ", *Rapport publié par la Direction de la Conservation des Eaux et du Sol & l'Institut de Recherche pour le Développement en Coopération (ORSTOM)*, 1995.
- [16] R. Suresh, "Soil and Water Conservation Engineering", *Standard Publishers Distributors*, 2002.
- [17] N. Haregeweyn, J. Poesen, J. Nyssen, G. Govers, G. Verstraeten, J. De Vente, J. Deckers, J. Moeyersons, & M. Haile, "Sediment yield variability in Northern Ethiopia: A quantitative analysis of its controlling factors", *Catena*. 75, pp. 65–76, 2008.
- [18] E. Roose, " Conservation des sols en zones méditerranéennes. Synthèse et proposition d'une nouvelle stratégie de lutte antiérosive : la GCES ", *Cahiers de l'ORSTOM Série Pédol.* XXVI-2, pp. 145-181, 1991.
- [19] M.R. Mosley, "Delimitation of New Zealand hydrology regions", *Journal of Hydrology*. 49, pp. 173-192, 1981.
- [20] G. Saporta, " Probabilités Analyse des données et Statistique ", *Editions TECHNIP. SPSS for Windows, Ref. 11.0.1. (2001): SPSS Inc 1989-2001. LEAD Technologies, Inc, LEADTOOLS*, 2001.