

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil



Memoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

De Master en Génie Civil

Option : « Constructions hydrauliques et aménagements »

THEME

***CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA VULNERABILITE
DES RETENUES COLLINAIRES***

« Application de la méthode ACP sous le logiciel R »

Présente par :

Melle DJEMA Fatiha

HAOUILI Sonia

Encadré par :

Prof. BOUZELHA Karima

Promotion : 2018/2019

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Mme. BOUZELHA Karima notre promotrice, Professeur au département de génie civil, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Un grand merci également à Mr HAMMOUM Hocine, Professeur au département de génie civil pour avoir eu la patience de répondre à nos innombrables questions.

Nos vifs remerciements aussi à Melle MILOUDI Nassima, Enseignante au Département Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou qui nous a beaucoup aidé à trouver des solutions pour avancer dans notre travail, et qui a toujours répondu présente.

Nous adressons aussi nos profondes reconnaissances et nos remerciements aux ingénieurs Mr BENADACHE Mouloud et Mr BENZEKRI Farhat de la Direction des Ressources en eau de la wilaya de Tizi-Ouzou par leurs présences et l'accompagnement pendant tout au long de nos missions d'expertises.

Un spécial remerciement aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

Enfin à tous ce qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Merci



Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail à :

La mémoire de ma grand-mère Halima.

Mes chers parents qui m'ont donnés leurs encouragements et conseils.

Mes chers frères Samir et Yacine.

Mes chère sœurs Lamia, Wissam, Nouara et ma princesse Amira.

Mes amis proches Kaci, Lysa, Serine, et Sarah et Sonia ma binôme avec qui j'ai partagé des moments de délire, joie, stresse et surtout de bonne humeur

A toute la promotion CHA 2019.

Fatiha





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Ceux qui ont fait de moi celle que je suis aujourd'hui

Ceux qui ont toujours cru en moi

A mes très chers parents

Mes trois anges gardiens

Mes alliés pour la vie

A mes trois frères Ahcene, Hocine et Saïd

Mon rayon de soleil en plein pluie

Celle qui illumine mes journées

A ma petite princesse adorée Alice

Mon autre moi, ma meilleure pour toujours

A ma très chère Katia

*Fatiha ma binôme, ainsi qu'aux toutes belles Lysa, Serine, et Sarah
avec qui j'ai partagé des moments de délire, joie, stresse et surtout de
bonne humeur*

A toute la promotion CHA 2019

A toute ma famille et tous ce que j'aime

Sonia



**Chapitre 1 : Evaluation de la vulnérabilité du parc de retenues collinaires
de la wilaya de Tizi Ouzou**

Figure 1.1 : Schéma d'une retenue en digue homogène	1
Figure 1.2 : Carte des sites des retenues collinaires et des principales stations hydrométrique au nord de l'Algérie.	5
Figure 1.3 : Présentation de la zone d'étude.....	6
Figure 1.4 : photo de Google Earth du parc retenues collinaires, wilaya de Tizi Ouzou.	7
Figure 1.5 : Organigramme de la méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques (Mathieu, 2003).	13
Figure 1.6 : Vue générale de la retenue Ait Toudert N°171	18
Figure 1.7 : Présence de fissures sur la crête.....	18
Figure 1.8 : Affaissement de la crête.	18
Figure 1.9 : Présence de végétation arbustive.....	18
Figure 1.10: Présence de hautes herbes.....	18
Figure 1.11 Erosion interne du talus aval	19
Figure 1.12: Végétation arbustive sur le talus aval	19
Figure 1.13: Glissement du talus aval de la retenue	19
Figure 1.14 : Obturation de l'évacuateur de crue.....	19
Figure 1.15 : Glissement de terrain sur les murs bajoyers.....	19
Figure 1.16 : Ruine des bajoyers au niveau de coursier.....	20
Figure 1.17: Ouverture du joint de rupture des bajoyers	20
Figure 1.18: Glissement de terrain sur les bajoyers de coursier	20
Figure 1.19 : Présence de fissures sur le bassin.....	20
Figure 1.20: Détérioration des murs bajoyers	20
Figure 1.21: Présence de végétation autour de la retenue (Djema et Haouili, 2019).....	24
Figure 1.22: Présence de végétation sur la crête de la retenue (Djema et Haouili, 2019).	24
Figure 1.23 : Présence de végétation arbustives sur le talus amont de la retenue (Djema et Haouili, 2019).....	25
Figure 1.24: Obturation de l'évacuateur de crue par la végétation (Djema et Haouili, 2019). 25	
Figure 1.25: Présence des fissures sur la crête (Djema et Haouili, 2019).	26
Figure 1.26: Corps de la digue endommagé par l'érosion interne (Djema et Haouili, 2019). .26	
Figure 1.27 : Glissement de terrain (Djema et Haouili, 2019).	27
Figure 1.28: Ruine et rupture du joints au niveau du coursier et bajoyers Djema et Haouili 2019).	27

Liste des figures

Figure 1.29 : Effondrement et détérioration des bassins de dissipation (Djema et Haouili, 2019).	28
Figure 1.30 : Envasement de la cuvette (Djema et Haouili 2019).	29
Figure 1.31: Vanne rouillée (Djema et Haouili 2019).	29

Chapitre 2 : Exposé de la méthode ACP

Figure 2. 1 :l'espace des individus (Husson, 2009).....	33
Figure 2. 2 : nuage des individus (Husson et al, 2009).....	34
Figure 2. 3 : l'espace des variables (Husson, 2009)	34
Figure 2. 4 : nuage des variables (Husson et al, 2009)	35
Figure 2. 5: représentation du nuage en 2D	36
Figure 2. 6: représentation du nuage en 3D	36
Figure 2. 7: représentation de G dans le repère (O, e_1 , e_2 , e_3) (Duby et al, 2008).....	38
Figure 2. 8: représentation des variables centrées dans le repère (G, e_1 , e_2 , e_3) (Duby et al, 2008)	39
Figure 2. 9 : construction d'un espace factoriel (Duby et al, 2008)	42
Figure 2. 10: ajustement d'un individu i (Husson,2009).....	43
Figure 2. 11: Représentation des individus dans les nouveaux axes (Duby et al, 2008)	47
Figure 2. 12: intensité de la corrélation sur l'intervalle à valeurs réelles [-1, +1]	49
Figure 2. 13 : cercle de corrélation (Duby et al, 2008).....	49

Chapitre 3: Application de l'ACP au parc des retenues collinaires de la wilaya de Tizi Ouzou, sous R

Figure 3.1 : Organigramme de l'ACP.	53
Figure 3.2 : Représentation graphique de la matrice des corrélations et des niveaux de signification	72
Figure 3.3 : Diagramme des valeurs propres.	74
Figure 3.4 : Représentation graphique de la contribution des variables à l'inertie des axes.	77
Figure 3.5 : Représentation graphique de la qualité de représentation des variables aux axes.	78
Figure 3.6 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-2).	80
Figure 3.7 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-3).....	81

Liste des figures

Figure 3.8: Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (2-3).....	82
Figure 3.9 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1-2).	87
Figure 3.10 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1-3).	88
Figure 3.11 : Représentation des individus dans le plan factoriel (2-3).	89
Figure 3.12: Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1-2)	90
Figure 3.13: Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1-3)	92
Figure 3.14 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (2-3)	93
Figure 3.15 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (1-2).....	94
Figure 3.16 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (1-3).....	95
Figure 3.17 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (2-3).....	95

**Chapitre 1 : Evaluation de la vulnérabilité du parc de retenues collinaires
de la wilaya de Tizi Ouzou**

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif des retenues collinaire de la willaya de Tizi-Ouzou (DRE, 2018)	8
Tableau 1.2 : Liste des paramètres d'analyse.	14
Tableau 1.3 : Grille hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre.	15
Tableau 1.4 : Classification d'une retenue en fonction de son « Iv ».	15
Tableau 1.5 : Résultats de l'indice de vulnérabilité des retenues collinaires expertisés	22

Chapitre 2 : Exposé de la méthode ACP

Tableau 2.1: représentation d'un type tableau de données ACP	32
--	----

**Chapitre 3: Application de l'ACP au parc des retenues collinaires de la wilaya
de Tizi Ouzou, sous R**

Tableau 3.1 Données brutes (n x p)	54
Tableau 3.2 : Tableau traité par R®	57
Tableau 3.3 : Moyenne et écart-type des variables.	59
Tableau 3.4 : Matrice des données centrées.	59
Tableau 3.5 : Matrice des données centres réduites.	60
Tableau 1.6 : Matrice de corrélation avec Iv.	62
Tableau 3.7 : Nouveau tableau de données ACP	63
Tableau 3.8 : Matrice de corrélation sans l'indice de vulnérabilité Iv	65
Tableau 1.9 : Tableau de données finales.	66
Tableau 3.10 : Matrice de corrélation finale.	67
Tableau 3.11 : Table de Bravais-Pearson (Dagnelie, 2011).....	68
Tableau 3.12 : Matrice des corrélations finale	70
Tableau 3.13 : Vecteurs propres	72
Tableau 3.14 : Valeurs propres et leur variance associée.	73
Tableau 3.15 : Coordonnées factorielles des variables.	74
Tableau 3.16 : Contribution des variables à l'inertie des axes.	75
Tableau 3.17 : Qualité des représentations des variables ($\cos^2$)	76
Tableau 3.18 : Coordonnées factorielles des individus.	82

Tableau 3.19 : Contribution relatives des individus à l'inertie des axes.....	83
Tableau 3.20 : Qualité des représentations des individus ($\cos^2$).....	85
Tableau 3.21 : contribution des variables à la formation de l'axe 1.....	90

Principales notations rencontrées dans ce travail par ordre d'apparition.

Symboles	Significations	Unités
Nei	note élémentaire d'une retenue	[-]
Pi	coefficient de pondération d'une retenue	[-]
Iv	indice de vulnérabilité d'une retenue	[-]
X	matricée de tableau de données	[-]
d₂	distance euclidienne entre deux individus	[-]
$\bar{X}_j$	moyenne de chaque variable j	[-]
σ_j	écart type de chaque variable j	[-]
r	coefficient de corrélation entre les différents variables	[-]
G	centre de gravité du nuage de point	[m]
Xc	matrice des données centrées	[-]
V	matrice de variance-covariance	[-]
var x	variance de la variable x	[-]
cov_{xy}	covariance des variables x et y	[-]
Y	matrice des données centrées réduites	[-]
D_{1/σ}	matrice diagonale	[-]
R	matrice des corrélations	[-]
I_G	inertie totale du nuage de point	[m ⁴]
λ_i	valeur propre	[-]
C_k	composante principale	[-]
C	matrice des composantes principales	[-]
Δ	matrice des axes principaux	[-]
u_i	axe factoriel	[-]

Introduction générale

**Chapitre 1 : Evaluation de la vulnérabilité du parc de retenues collinaires
de la wilaya de Tizi Ouzou**

Introduction	1
1.1. Définition.....	1
1.2. Historique des retenues collinaires en Algérie (<i>Salem</i>).....	2
1.3. Développement des retenues collinaires en Algérie (1985-1989).....	3
1.4. Normalisation des étapes des études des retenues collinaires (<i>Benlaoukli et al. 2004</i>).....	4
1.5. Coût et durée de la réalisation d'une retenue collinaire	5
1.6. Présentation du parc des retenues collinaires en Algérie	5
1.7. Parc de retenues collinaires de la Wilaya de Tizi-Ouzou.....	6
1.7.1. Présentation de la zone d'étude	6
1.7.2. Présentation du parc	6
1.7.3. Les insuffisances observées dans la gestion des retenues collinaires.....	12
1.7.4. Les suggestions éventuelles pour une utilisation efficace et appropriée des ressources hydriques mobilisées à travers les retenues collinaires.....	12
1.8. Expertise et diagnostique des retenues collinaires.....	12
1.9. Application de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour l'évaluation de la vulnérabilité des RC du parc de la wilaya de Tizi Ouzou	16
1.10. Pathologies rencontrées sur les retenues collinaires expertisées du parc de la wilaya de Tizi-Ouzou.....	24
Conclusion	29

Chapitre 2 : Exposé de la méthode ACP

Introduction	30
2.1. Définition de l'ACP.....	30
2.2. Démarche de l'ACP.....	31
2.3. Données d'une ACP (<i>Husson et al, 2009</i>)	31
2.3.1. L'espace des individus.....	32

2.3.2. L'espace des variables	33
2.4. Représentation graphique	34
2.4.1. Représentation des individus	34
2.4.2. Représentation des variables	35
2.6. Solution.....	36
2.6.1. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des individus	36
2.6.2. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des variables	44
2.7. Analyse en composantes principales normée et ses particularités	45
2.8. Interprétation des résultats de l'ACP	45
2.8.1. Etude des individus	46
Représentation des individus dans les nouveaux axes	46
Qualité de représentation des individus.....	46
Interprétation des axes factoriels par les points des individus	47
2.8.2. Etude des variables	47
Représentation des variables dans les nouveaux axes.....	47
2.9. Lien entre les deux études	49
2.10. Individus et variables supplémentaires.....	49
Conclusion.....	50

***Chapitre 3: Application de l'ACP au parc des retenues collinaires de la wilaya
de Tizi Ouzou, sous R***

Introduction	51
3.1. Présentation des données.....	51
3.2. Conditions d'application de l'ACP.....	56
3.2.1. Test de sphéricité de Bartlett.....	56
3.2.2. Non singularité de la matrice des corrélations.	57
3.3. Calcul de la matrice de corrélation	57
3.3.1. Présentation des données.....	57
3.3.2. Calcul des moyennes et écarts types des variables	58

3.3.3. Centrage du tableau de données (matrice centrée)	59
3.3.4. Réduction du tableau de données centrées (matrice centre réduite)	60
3.4. Vérification des conditions d'application de l'ACP	63
3.5. Choix du nombre d'axe à retenir	72
3.5.1. Vecteurs propres	72
3.5.2. Valeurs propres et leurs variance	72
3.6. Interprétation des résultats de l'ACP	74
3.6.1 Etude des variables	74
3.6.1.1. Coordonnées factorielles des variables	74
3.6.1.2. Contribution des variables à l'inertie des axes	75
3.6.1.3. Qualité de représentation des variables (cosinus carrées)	76
3.6.1.4. Cercles de corrélations	78
3.6.2. Etude des individus	82
3.6.2.1. Cordonnées factoriel des individus	82
3.6.2.2. Contribution relative des individus à l'inertie des axes	83
3.6.2.3. Qualité des représentations des individus (cosinus carrés)	84
3.6.2.4. Projection des individus dans les plans factoriels	86
3.6.3. Lien entre les variables et les individus	88
3.7. Variables supplémentaires	92
Conclusion	95
Conclusion générale	
Références bibliographiques	
Annexes	

Introduction générale

L'important développement des retenues collinaires dans l'irrigation en Algérie est lié à la nécessité de stocker l'eau pour se prémunir contre la variabilité saisonnière ou interannuelle des crues. Dans les années quatre-vingt, un vaste programme de retenues collinaires en remblai compacté (au nombre de 83) a été réalisé par la Direction de l'Hydraulique (DHW) de la Wilaya de Tizi Ouzou. Ces retenues collinaires ne sont pas gérées par un organisme de gestion, et pour la plus part leur exploitation est confiée aux agriculteurs. Le manque d'entretien de ces ouvrages exposés aux menaces naturelles (neige, séisme, glissement de terrains...), entraîne une accélération du phénomène de vieillissement, par la dégradation des digues en remblai et des ouvrages annexes. Aujourd'hui, soit quarante ans après il est temps de faire le point sur l'état de ces des retenues collinaires par le diagnostic et l'expertise. Car la maîtrise du phénomène de vieillissement devient un enjeu économique majeur. C'est ainsi que (Bouzelha et al, 2012) ont développé une méthode simple et pratique permettant à un professionnel (technicien ou ingénieur) du génie civil d'évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité aux aléas naturels (neige, vent, séisme ...etc.) d'une retenue collinaire, en les guidant dans leur diagnostic. Cette méthode est basée sur une évaluation multicritère par la détermination de l'indice de vulnérabilité «Iv» de la retenue, en faisant intervenir 17 paramètres influents (environnementaux, structuraux et fonctionnels).

Pour analyser ces paramètres et mettre en valeur la sensibilité de certains par rapport aux autres et dans le but de rendre l'information moins redondante, nous utilisons dans le cadre de ce mémoire, une méthode statistique dite ACP « Analyse en Composantes Principales ». Cette méthode, appartenant à la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariées, permet d'explorer les liaisons entre variables (paramètres) et les ressemblances entre individus (retenues).

Dans le cadre de cette étude, et pour appliquer la méthode ACP, nous considérons un tableau de données rectangulaire avec des individus (retenues collinaires) en ligne et des variables quantitatives (paramètres) en colonne. Ainsi, pour démontrer l'efficacité de l'ACP, nous appliquons à un parc de 40 retenues collinaires expertisées dans la wilaya de Tizi-Ouzou et dans les daïras suivantes : Ouacif, Ouadhias, Draa El Mizan et Draa Ben Khedda Bouzeguene, Ouaguenoun, Azazga, Mekla et Azzfoun. Pour récolter l'ensemble des informations nécessaires au calcul des indices de vulnérabilité de différents ouvrages, des fiches d'enquête conçues spécialement pour le terrain (Saradouni, 2012) sont renseignées lors de différentes missions de terrain effectuées.

Pour accomplir ce travail de recherche nous l'avons structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré tout d'abord à la présentation du parc de retenues collinaires en Algérie. Ensuite, la méthode de l'indice de vulnérabilité aux aléas naturels

(séisme, neige, vent....) est exposée. Cette méthode de diagnostic est appliquée à l'échelle du parc de la wilaya de Tizi Ouzou, que nous avons expertisé.

Le deuxième chapitre est dédié à la méthode ACP, à savoir l'historique de la méthode, ses champs d'application, les logiciels qui sont utilisés pour le calcul de l'ACP et la démarche de l'ACP. Par ailleurs, les différentes étapes de calcul et l'interprétation des résultats d'une ACP normé seront présentés.

Le troisième et dernier chapitre est consacré à l'application de la méthode ACP au parc des retenues collinaire expertisé. Pour traiter le tableau de données obtenues, constitué de retenues collinaires (individus) en lignes et de paramètres d'analyse (variables) en colonnes, le logiciel R[®] est utilisé. Ce logiciel est un outil d'analyse et de traitement statistique. Il permet de ressortir les corrélations existantes entre les paramètres d'analyse et les ressemblances entre les retenues collinaires.

***Chapitre 1 : Evaluation de la vulnérabilité
du parc de retenues collinaires
de la wilaya de Tizi Ouzou***

Introduction

Le territoire national est caractérisé par un climat-aride et semi-aride. Cette aridité du climat classe l'Algérie parmi les pays où le problème de disponibilité de l'eau se pose avec acuité. Pour relever le défi de l'eau depuis des années, l'Algérie est intervenue dans le domaine de la gestion intégrée de l'eau par bassin versant avec une approche plutôt sectorielle, et une protection des ressources en eau par la réalisation d'un nombre assez important de retenue collinaire, à travers l'ensemble de son territoire (*Mekaoussi, 2010*). Les retenues collinaires constituent une ressource complémentaire intéressante pour l'irrigation dans les zones rurales et montagneuses.

Ces investissements sont malheureusement effectués hâtivement sur la base d'études sommaires. Plus de 50% de ces retenues collinaires réalisées ont été perdues à cause du manque de gestion et d'entretien, le reste de ces retenues se dégradent. Afin de réduire les pertes et les dommages de ces structures, une évaluation de l'état de ces retenues devient indispensable.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce premier chapitre, qui a pour objectif l'expertise du parc de retenue collinaire de la wilaya de Tizi Ouzou. Cette expertise s'inscrit dans la continuité celles entreprises par Saradouni(2012) dans le cadre de son mémoire de magister et par Gueddoun et Mostefai en (2018), dans le cadre de leur mémoire de master. La méthode dite de « diagnostic et d'expertise » développée par Bouzelha et al. (2012) sera utilisée pour déterminer l'indice de vulnérabilité de ces retenues. Aussi, la présentation du parc de retenues collinaires en Algérie, son historique et son mode de gestion seront présentés.

1.1. Définition

Les retenues collinaires sont des ouvrages de stockage d'eau qui sont remplies par les eaux de surface ou les eaux de ruissellement. Elles sont destinées généralement à améliorer une agriculture existante par l'irrigation de petits périmètres. L'ouvrage est constitué d'une digue en terre compacté et enrochement. Un schéma descriptif d'une retenue homogène est donnée en figure 1.1.

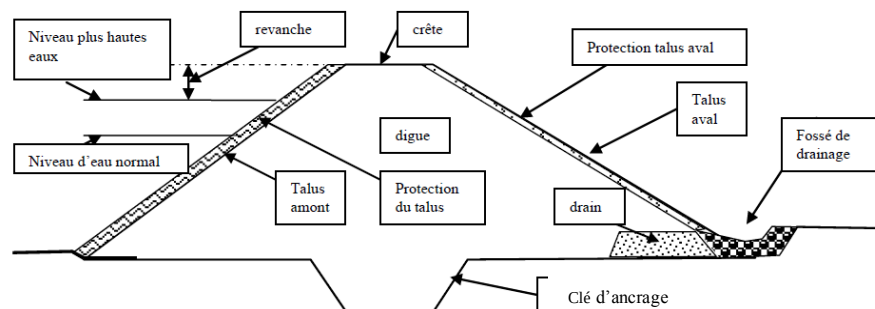


Figure 1.1 : Schéma d'une retenue en digue homogène

Une retenue collinaire possède en principe les caractéristiques suivantes (*PNUD, 1987*) :

- Une hauteur de retenue de digue jusqu'à 15 m, à ne dépasser que exceptionnellement.
- Une capacité approximative de la retenue de 50.000 m³ à 1 million de m³.
- Rapport entre la superficie du bassin versant et celle du lac qui ne doit pas dépasser certaines valeurs maximales. Ces valeurs dépendent naturellement de la pluviosité : à titre indicatif, autour de 50 pour les retenues les plus petites et 20 pour les plus grandes.

1.2. Historique des retenues collinaires en Algérie (*Salem*)

Durant la période coloniale, la réalisation des retenues collinaires et leur exploitation étaient le fait des colons, qui étaient les propriétaires des domaines agricoles les plus productifs. Cependant, le plan de Constantine (1959-1963) avait envisagé un grand programme de retenues collinaires inspiré de l'exemple Italien. Mais une étude de reconnaissance générale des zones favorables aux retenues collinaires menée en 1962, a montré les difficultés inhérentes au contexte algérien : forte irrégularité des pluies, pentes accentuées, envasement rapide de la cuvette. Ainsi, les digues en terre, au lieu d'avoir 7 mètres de hauteur, devaient atteindre des hauteurs de 15 mètres et plus, ce qui en faisait des petits barrages.

A partir de 1982, l'administration de l'Hydraulique décide de lancer un grand programme d'étude et de réalisation, pratiquement sans tenir compte de l'expérience précédente. La mise en œuvre devait se faire par les Directions de l'Hydraulique des wilayas sous la supervision de la Direction Centrale. Le bilan physique établi deux ans plus tard, a montré que le programme ne s'est pas déroulé d'une manière satisfaisante, certains avaient même parlé d'échec.

Une analyse du déroulement du programme, a permis de cerner les causes principales de l'échec :

- La méthodologie d'étude appliquée n'était pas toujours adaptée aux retenues collinaires. Les études étaient menées dans le même esprit que les grands barrages.
- Le choix des sites n'était pas toujours le meilleur.
- La connaissance insuffisante, voire inexistante, du régime des écoulements superficiel dans les bassins de petites dimensions.
- Les délais d'études et de réalisation étaient trop longs. La méthodologie d'étude appliquée n'était pas toujours adaptée aux retenues collinaires. Les études étaient menées dans le même esprit que les grands barrages.

1.3. Développement des retenues collinaires en Algérie (1985-1989)

A travers les expériences, même limitées, on a pris progressivement conscience, que les retenues collinaires constituent une ressource complémentaire intéressante pour l'irrigation dans les zones rurales et montagneuses. Par conséquent, on a jugé opportun de développer les programmes de retenues collinaires pour en augmenter l'utilisation et l'élargir aussi à la lutte contre les incendies et à l'abreuvement du cheptel.

Comme nous l'avons vu plus haut, les retenues collinaires posent des problèmes spécifiques : hydrologie, mécanique des sols,...etc.

Malgré ces contraintes, le gouvernement décide le lancement d'un programme important d'ouvrages collinaires. Sur le plan politique, le programme a reçu un soutien extraordinaire, qui a permis une mobilisation générale pour sa réalisation. Sur le plan technique, il fallait immédiatement s'organiser pour étudier et réaliser ce type d'ouvrage. Ce programme a pour objectif l'étude et réalisation de 700 retenues collinaires et 300 petits barrages.

Pour accroître la maîtrise des programmes d'études et de réalisation, plusieurs actions d'accompagnement ont été entreprises, en particulier pour asseoir des principes de conception et définir des méthodes de réalisation. Dans ce cadre, on peut citer les actions importantes suivantes :

- Le projet maghrébin de développement des ressources en eau (PNUD-RAB – 80/011), qui a abouti à l'élaboration d'un « Guide Magrébin pour l'exécution des études et travaux de retenues »
- La mise en place d'une équipe pluridisciplinaire d'experts étrangers, au niveau d'une Direction de Wilaya, et exerçant au sein même de l'administration et avec les ingénieurs et techniciens locaux, pour étudier un ensemble de projets collinaires.
- L'élaboration d'un projet pilote, dans le cadre de la coopération Algéro-Italienne, pour l'étude et la réalisation de retenues collinaires et leurs périmètres, par des équipes mixtes des deux pays.
- Lancement d'une étude méthodologique sur l'hydrologie des petits bassins versants et mise au point d'outils de calculs de l'hydrologie (formule, abaques, cartes,...).
- Organisation de rassemblements techniques telle que : le Séminaire National sur les retenues collinaires à Sétif en février 1986, et des journées Techniques sur les retenues collinaires à

Guelma en septembre 1986, pour améliorer les connaissances acquises par les ingénieurs et techniciens chargés de l'exécution des projets (*Salem*).

1.4. Normalisation des étapes des études des retenues collinaires (*Benlaoukli et al. 2004*)

En fonction de la décision qui inclut la déclaration d'un nouveau programme de réalisation de retenues sur la base de l'expérience nationale et internationale, et à fin d'assurer une normalisation dans la conception des études, six (06) missions se sont dégagées :

- **Mission 1 :** "Travaux topographiques" consistant en des levés de la cuvette et du site respectivement sur 40 ha (Echelle 1/2000^{ème}) et 10 ha (Echelle 1/500^{ème}).
- **Mission 2 :** "Etude hydrologique" faisant ressortir la répartition intra-annuelle des précipitations, de l'évaporation et des apports liquides, l'hydrogramme de crues probables (10 et 1%) et les apports solides.
- **Mission 3 :** "Etude géologique et géotechnique" consistant d'une part en une étude de la carte géologique et une visite de terrain et d'autre part en une campagne de reconnaissance des fondations et des matériaux de construction (zone d'emprunt). Aussi, dans la campagne de prospection, le nombre de sondages, leur linéaire, le nombre de fouilles et le nombre d'échantillons à analyser en laboratoire sont rationalisés. En effet, trois sondages sur l'axe de la digue suffisent avec un linéaire par sondage égale à la hauteur de la digue. Le nombre de puits à réaliser dans la cuvette est au maximum 10, avec une profondeur inférieure à 3m.
- **Mission 4 :** "Etude de faisabilité" consiste en la détermination des courbes topographiques (hauteur – surface – capacité), en une étude de régularisation saisonnière tenant compte des apports, de l'évaporation et les besoins en eau (Touaibia, 1995), en considérant que les pertes par infiltration représentent 10 à 18% de l'apport moyen.
- **Mission 5 :** "Etude d'exécution" le projet d'exécution est composé du rapport explicatif et justificatif (note de calcul) complétant le rapport de synthèse, avec une étude d'infiltration, une étude des drains et filtres, un calcul de tassement et de stabilités des talus.
- **Mission 6 :** "Dossier d'appel d'offre (DAO)", ce document renferme en plus des règles financières et normes techniques, le détail des différents travaux à effectuer pour la

construction des ouvrages, ainsi que tous les volumes des travaux à effectuer pour la réalisation de l'aménagement.

1.5. Coût et durée de la réalisation d'une retenue collinaire

Contrairement aux grands barrages, les petits barrages et les retenues collinaires ont été considérés différents vu leurs particularités. La consistance des études a été sensiblement modifiée avec comme résultat des délais de réalisation qui sont passés de 12 à 6 mois se répercutant aussi sur le coût global, qui est passé de 2 500 000 à 1 200 000 DA (50 000 à 25 000 \$), sans pour autant affecter la qualité et la fiabilité de l'étude. Cette réduction a été obtenue grâce à la normalisation de certaines études et à la rationalisation des tâches, comme l'étude hydrologique, les reconnaissances géologiques et géotechniques (*Benlaoukli et al., 2004*).

1.6. Présentation du parc des retenues collinaires en Algérie

Neuf cents retenues collinaires avaient été réalisées durant les années quatre-vingt, sur tout le territoire national, totalisant une capacité de stockage de 118 millions de m³. Actuellement, le ministère des ressources en eau a déclaré que le nombre de retenues collinaires en exploitation destinées à l'irrigation est de 463 pour une capacité de 59 millions de m³. Avec le programme de réhabilitation et de construction de nouvelles retenues collinaires mis en œuvre au début 2011, l'Algérie disposera d'un nombre de 581 retenues collinaires à la fin de 2014 ayant une capacité total de 70 millions de m³/an. Ces retenues se répartissent par région hydrographique comme le montre la **figure 1.2**

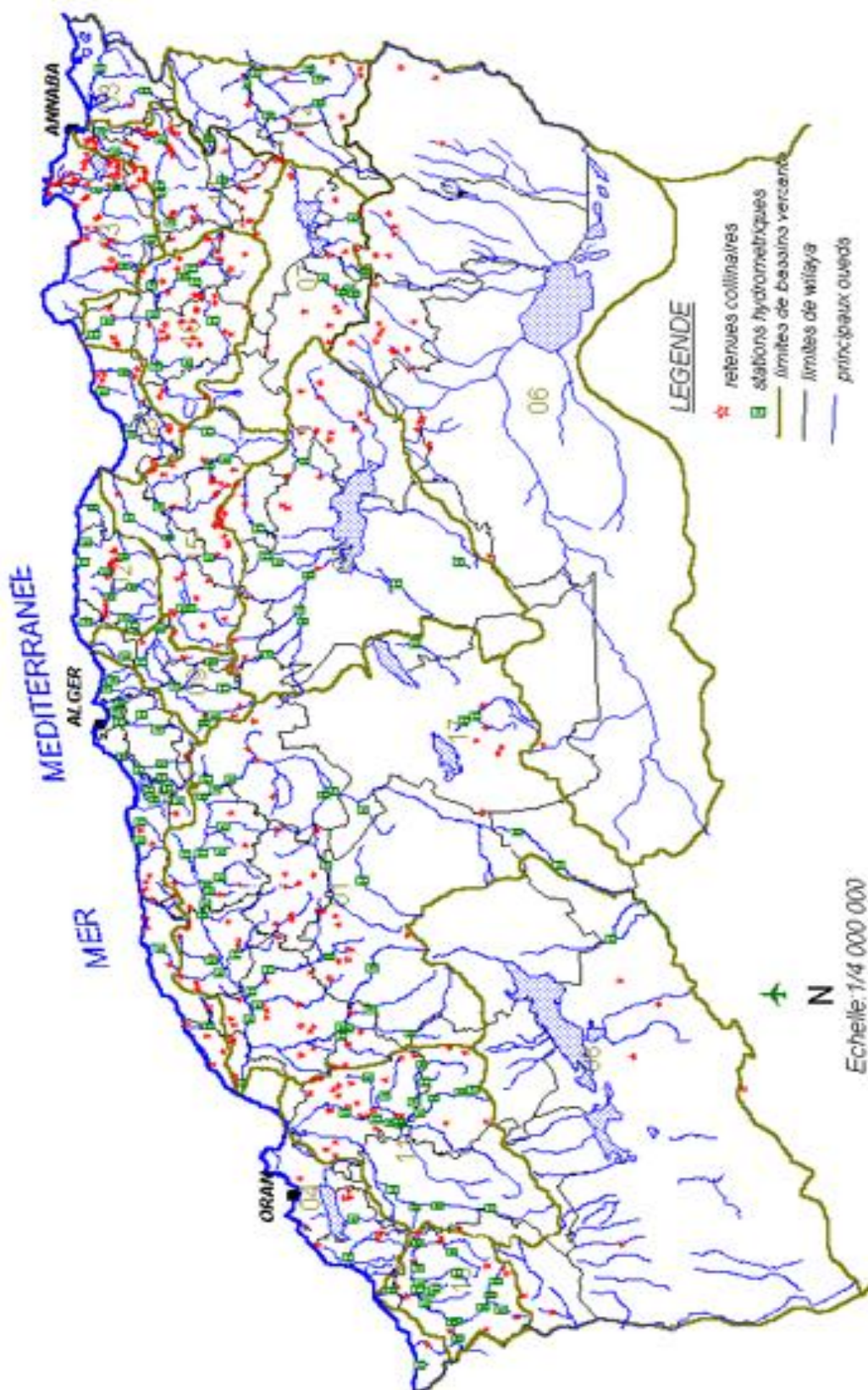


Figure 1.2 : Carte des sites des retenues collinaires et des principales stations hydrométrique au nord de l'Algérie.

1.7. Parc de retenues collinaires de la Wilaya de Tizi-Ouzou

1.7.1. Présentation de la zone d'étude

La wilaya de Tizi-Ouzou est une wilaya algérienne située dans la région de la grande kabylie en plein cœur du massif du Djurdjura. Elle est divisée administrativement en 67 communes et 21 daïra (**figure 1.3**).

La wilaya de Tizi-Ouzou appartient à la zone du climat méditerranéen caractérisée par un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Elle fait partie du vaste bassin versant que forme le territoire de la wilaya, ou le sens de l'écoulement des cours d'eau va du Sud au Nord pour se déverser dans l'oued sebou.

Selon la réglementation appliquée en Algérie, la wilaya de Tizi-Ouzou est classée comme :

- Zone de moyenne sismicité IIa (RPA, 2003).
- Zone de neige A (RNV, 1999).
- Zone de vent I (RNV, 1999).



Figure 1.3 : Présentation de la zone d'étude.

1.7.2. Présentation du parc

La Direction des Ressources en Eau de Tizi-Ouzou renferme dans sa nomenclature un patrimoine de 83 retenues collinaires (**figure 1.4**) d'une capacité total de 5.459 millions m³ à travers le territoire de la Wilaya, réparties sur 38 communes (**tableau 1.1**). L'ensemble de ces retenues collinaires ont été réalisées durant les années 1980 et début des années 1990. Actuellement, seules 75 retenues collinaire sont en exploitation, la quantité d'eau mobilisée est de 5,09 millions m³, les 08 autres restantes sont déclassées, cause du mal entretient, de la négligence, de la dévastation par débit de crue important, de l'envasement, ou encore englouties par le béton du fait de l'extension urbaine.

Tableau 1.1 : Tableau récapitulatif des retenues collinaire de la willaya de Tizi-Ouzou (DRE, 2018)

NOM RC	Code RC DHE.TO	Commune	S.B km2	Type	Hauteur (m)	Capacité 10 ³ m ³	Année de mise en service	État
200	02 15 39 01	A.AISSA MIMOUN	0,7	retenue collinaire	9	60	1989	en exploitation
DSA	02 15 39 02	A.AISSA MIMOUN	0,9	petit barrage	11	40	1999	en exploitation
270	02 15 61 01	A.GUEHRENE	2,6	retenue collinaire	8	40	1985	en exploitation
258	02 15 25 01	AIN EL ZAOUA	1,6	retenue collinaire	10	60	1989	en exploitation
259	02 15 25 02	AIN EL ZAOUA	0,75	retenue collinaire	9	80	1987	Réhabilité
261	02 15 25 03	AIN EL ZAOUA	1,2	retenue collinaire	7	55	1985	en exploitation
301	02 15 65 01	AIT BOUADOU	1,7	retenue collinaire	9	45	1990	en exploitation
15	02 15 13 01	AIT CHAFAA	0,9	petit barrage	10,5	30	1994	Réhabilité
67	02 15 58 03	AIT KHELLILI	0,6	retenue collinaire	10	74	-	en exploitation
400	02 15 58 01	AIT KHELLILI	1,2	retenue collinaire	10	80	1989	Réhabilité
361	02 15 58 02	AIT KHELLILI (mghira)	1,2	retenue collinaire	10	60	-	Réhabilité
169	02 15 67 01	AIT TOUDERT	0,9	retenue collinaire	9	45	1987	en exploitation
170	02 15 67 02	AIT TOUDERT	0,85	retenue collinaire	8	50	1988	en exploitation
171	02 15 67 03	AIT TOUDERT	1,7	petit barrage	12	60	1989	en exploitation
172	02 15 67 04	AIT TOUDERT	0,75	retenue collinaire	10	50	-	en exploitation
492	02 15 27 01	AIT YAHIA	0,2	retenue collinaire	10	60	1988	exploitation
10	02 15 37 01	AZEFFOUN	2,4	retenue collinaire	9,5	40	1986	à réhabiliter
11	02 15 37 02	AZEFFOUN	1,8	retenue collinaire	10	70	1987	exploitation
14	02 15 37 04	AZEFFOUN	0,68	petit barrage	11	40	1994	en exploitation
DSA	02 15 37 03	AZEFFOUN	1,1	petit barrage	12	60	1997	en exploitation
DSA	02 15 37 05	AZEFFOUN	0,55	petit barrage	12,7	48	1999	en exploitation

407	02 15 15 01	BENI AISSI	5	retenue collinaire	10	60	1987	en exploitation
/	02 15 15 02	BENI AISSI	/	retenue collinaire	10	60	1991	R C déclassée
257	02 15 40 01	BOGHNI	0,7	retenue collinaire	10	65	1997	exploitation
/	02 15 40 02	BOGHNI	2,3	retenue collinaire	9	35	1987	R C déclassée
405	02 15 55 01	BOUDJEMA	1,71	retenue collinaire	10	100	1992	Réhabilité
252	02 15 10 03	BOUFHIMA	/	retenue collinaire	10	100	1985	en exploitation
DSA	02 15 34 01	BOUZEGUENE	0,9	retenue collinaire	10	75	1999	en exploitation
DSA	02 15 34 02	BOUZEGUENE	1,2	petit barrage	13	52	1999	en exploitation
406	02 15 47 02	DRAA BEN KHEDDA	0,95	petit barrage	11	70	1987	en exploitation
413	02 15 47 01	DRAA BEN KHEDDA	2,4	petit barrage	12	270	1988	en exploitation
415	02 15 47 03	DRAA BEN KHEDDA	1,4	petit barrage	11	100	1988	en exploitation
260	02 15 10 01	DRAA EL MIZAN	0,75	retenue collinaire	8,5	35	1986	en exploitation
265	02 15 10 02	DRAA EL MIZAN	1,65	retenue collinaire	8,5	70	1987	en exploitation
369	02 15 04 01	FREHA	1,8	retenue collinaire	10	30	1987	en exploitation
389	02 15 04 07	FREHA	0,56	retenue collinaire	8	50	1985	Réhabilité
395	02 15 04 02	FREHA	0,71	retenue collinaire	9,5	55	1988	à réhabiliter
396	02 15 04 03	FREHA	1,8	retenue collinaire	9,5	100	1986	Réhabilité
397	02 15 04 04	FREHA	0,71	retenue collinaire	9,5	45	1989	Réhabilité
398	02 15 04 05	FREHA	2	retenue collinaire	10	100	-	en exploitation
/	02 15 04 06	FREHA	0,6	retenue collinaire	9	44	1999	R C déclassée
490	02 15 17 01	IFERHOUNEN	0,9	retenue collinaire	8	50	1986	en exploitation
430	02 15 54 01	IFLISSEN	1,2	retenue collinaire	10	60	1989	en exploitation
399	02 15 19 01	ILOULA OUMALOU	1,3	retenue collinaire	10	80	1998	en exploitation
DSA	02 15 19 02	ILOULA OUMALOU	0,4	retenue collinaire	8	40	2000	en exploitation
491	02 15 63 01	IMSOUHAL	0,75	retenue collinaire	9	55	1988	en exploitation
480	02 15 07 01	IRDJEN	0,55	retenue collinaire	9	58	1985	en exploitation

424	02 15 09 01	MAKOUDA	0,92	retenue collinaire	7	80	1986	en exploitation
425	02 15 09 02	MAKOUDA	2,16	retenue collinaire	8	240	1986	en exploitation
427	02 15 09 03	MAKOUDA	1,2	petit barrage	12	75	1987	en exploitation
429	02 15 09 04	MAKOUDA	2	retenue collinaire	8	60	-	en exploitation
/	02 15 06 01	MECHTRAS	/	retenue collinaire	10	60	1987	R C déclassée
367	02 15 50 01	MEKLA	0,9	retenue collinaire	8,5	100	1985	Réhabilité
368	02 15 50 02	MEKLA	0,8	retenue collinaire	8,5	70	1986	en exploitation
391	02 15 50 05	MEKLA	2,3	retenue collinaire	10	40	1988	Réhabilité
393	02 15 50 04	MEKLA	0,53	retenue collinaire	7	48	1985	Réhabilité
/	02 15 50 06	MEKLA	0,69	retenue collinaire	10	40	1987	R C déclassée
394	02 15 50 03	MEKLA (chaoufa)	2,6	retenue collinaire	7	40	1986	Réhabilité
360	02 15 24 02	OUAGUENOUN	1,4	retenue collinaire	10	50	1988	Réhabilité
382	02 15 24 01	OUAGUENOUN	0,78	retenue collinaire	7	30	1985	en exploitation
421	02 15 59 01	SIDI NAAMANE	0,7	retenue collinaire	8	100	1986	en exploitation
426	02 15 59 02	SIDI NAAMANE	1,63	retenue collinaire	9,6	150	1987	en exploitation
428	02 15 59 03	SIDI NAAMANE	1,4	retenue collinaire	9	100	1985	à réhabiliter
DSA	02 15 05 01	SOUAMAA	0,75	petit barrage	11	60	-	en exploitation
418	02 15 64 01	TADMAIT	1,5	retenue collinaire	8	55	1986	Réhabilité
201	02 15 08 04	TIMIZART	1	retenue collinaire	9	60	1989	Réhabilité
363	02 15 08 01	TIMIZART	1,4	retenue collinaire	9	70	1986	Réhabilité
366	02 15 08 02	TIMIZART	1,1	retenue collinaire	10	135	1985	Réhabilité
388	02 15 08 03	TIMIZART	2	retenue collinaire	8	60	1986	Réhabilité
401	02 15 43 01	TIRMITINE	0,8	retenue collinaire	9	70	1987	en exploitation
402	02 15 43 02	TIRMITINE	1	retenue collinaire	8	115	1985	en exploitation
410	02 15 43 03	TIRMITINE	0,8	retenue collinaire	7	55	1985	en exploitation
411	02 15 43 04	TIRMITINE	2,2	retenue collinaire	7	40	1985	en exploitation

Chapitre 1 : Evaluation de la vulnérabilité du parc de retenues collinaires de la wilaya de Tizi Ouzou

412	02 15 43 05	TIRMITINE	0,6	retenue collinaire	7	35	1985	en exploitation
263	02 15 11 01	TIZI GHENNIF	0,69	retenue collinaire	10	35	1986	en exploitation
264	02 15 11 02	TIZI GHENNIF	2,2	retenue collinaire	7	30	1987	en exploitation
/	02 15 11 03	TIZI GHENNIF	0,9	retenue collinaire	8	35	1986	R C déclassée
300	02 15 51 01	TIZI N'TLATA	0,6	retenue collinaire	9	60	1989	Réhabilité
408	02 15 01 01	TIZI OUZOU	0,6	retenue collinaire	9	40	1987	Réhabilité
/	02 15 01 02	TIZI OUZOU	0,95	petit barrage	10,5	55	1987	R C déclassée
/	02 15 22 01	TIZI RACHED	1	retenue collinaire	10	40	1986	R C déclassée
381	02 15 20 01	YAKOURENE	0,7	retenue collinaire	10	40	1986	Réhabilité
383	02 15 23 01	ZEKRI	0,75	retenue collinaire	8	80	-	en exploitation
Total	/	/	/	/	/	5090	/	/

1.7.3. Les insuffisances observées dans la gestion des retenues collinaires

Les retenues collinaires souffrent du problème de l'absence d'organisme de gestion. Leurs exploitation se fait anarchiquement par les agriculteurs riverains sans pour autant procéder à leurs entretiens. Ainsi, les techniques culturales choisies par les agriculteurs (méthodes de labours) favorisent l'érosion des terres vers la cuvette, ce qui provoque l'envasement des retenues collinaires.

1.7.4. Les suggestions éventuelles pour une utilisation efficace et appropriée des ressources hydriques mobilisées à travers les retenues collinaires

Pour assurer une meilleure gestion des retenues collinaires, une campagne de sensibilisation envers les agriculteurs a été lancée par la Direction des Ressources en Eau en collaboration avec la Direction des Services Agricoles de Tizi-Ouzou, afin de constituer un groupement d'intérêt commun et prendre en charge la gestion de ces retenues. A ce jour, aucune association n'a pu voir le jour du fait du non adhésion des agriculteurs à cette initiative. Aussi, Il y a lieu de savoir qu'un grand nombre de retenues collinaires souffre du problème d'envasement et de dégradation du fait de l'absence de gestionnaires qui devraient prendre en charge leurs entretiens. A noter que la durée de vie d'une retenue collinaire est de 25 à 30 ans, ce qui est largement dépassé pour la plus part des retenues en exploitations. Malgré cela, à fin de préserver ce patrimoine, la Direction des Ressources en Eau de Tizi-Ouzou a procédé depuis 2007 à ce jour à la réhabilitation de 53 retenues et a pu permettre ainsi le rallongement de la durée de vie des retenues collinaires et la mobilisation d'une quantité plus importante de la ressource hydrique.

1.8. Expertise et diagnostique des retenues collinaires

La vulnérabilité d'une structure génie civil est définie comme étant le degré de perte qu'elle subit lors d'une catastrophe naturelle (vent, neige, séismes, cyclones, tsunamis...etc.). Sa nature et son estimation varient selon que cet élément représente des structures sociales, des structures physiques ou des actifs économiques. Pour cela, l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages vis-à-vis de ces aléas naturels est un élément très important dans les stratégies de prévention (réduire le risque de ces aléas). A ce jour, il n'existe pas une loi dite de diagnostic. Cependant, plusieurs gestionnaires de parcs d'ouvrages et d'autres organismes ont développé différentes méthodes pour évaluer des ouvrages de génie civil à des fins de diagnostic, d'analyse des risques et de programmation d'actions de maintenance. Ces méthodes peuvent être réparties en deux : **les méthodes internes** et **les méthodes externes** d'analyse de risques (*Talon et al, 2009*), (*Zwingelstein, 1996*).

Les **méthodes internes** reposent sur la connaissance profonde du fonctionnement du système étudié (un ouvrage en génie civil). A partir de modélisations, il est alors possible de prévoir son comportement futur et d'analyser ensuite les risques. Selon le type de modèle décrivant le système, on distingue deux approches : la modélisation physique et la modélisation fonctionnelle par la sûreté de fonctionnement.

Les **méthodes externes** s'appliquent dans des contextes où la modélisation des mécanismes (physiques ou fonctionnels) n'est techniquement pas possible ou pas adaptée au niveau de préoccupation, compte tenu de sa complexité ou de son coût. En fonction des informations disponibles, on distingue les méthodes basées sur l'analyse statistique et celles basées sur l'expertise.

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons à la méthode de diagnostic et d'expertise développée par (Bouzelha et al, 2012) pour estimer l'état des retenues collinaires, par la détermination de leurs indices de vulnérabilité (Iv). Cette méthode est basée sur trois types d'analyses : environnementale, fonctionnelle et structurelle (figure 1.3).

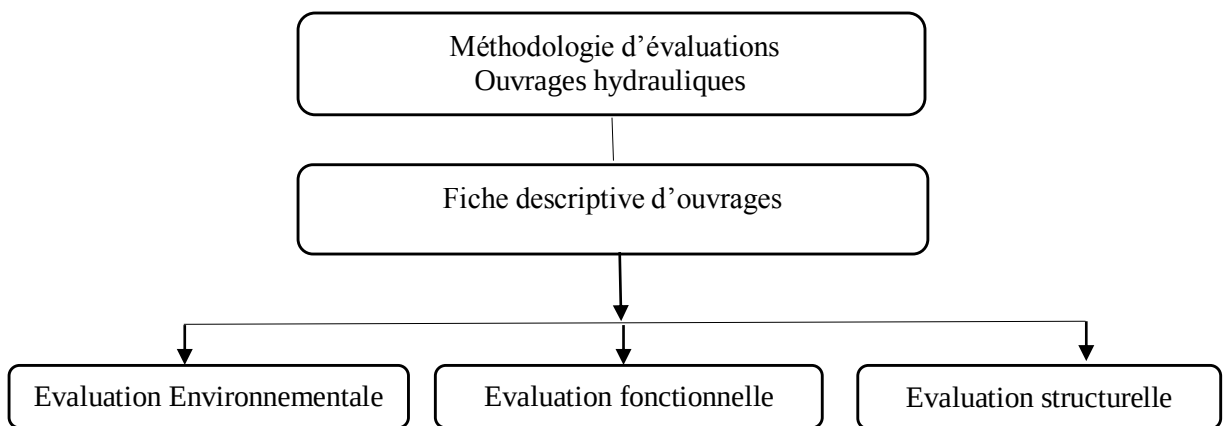


Figure 1.5 : Organigramme de la méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques (Mathieu, 2003).

Pour évaluer l'indice de vulnérabilité d'une retenue collinaire homogène (remblai compacté) vis-à-vis des aléas naturels, dix-sept (**17**) paramètres influençant sur la vulnérabilité sont définis (tableau 1.2).

Tableau 1.2 : Liste des paramètres d'analyse.

Type d'analyse	N°	Désignation des paramètres
Analyse environnementale	1	Implantation de la retenue
	2	Zone sismique
	3	Type de sol
	4	Zone de neige
	5	Zone de vent
Analyse structurelle	6	Etanchéité du corps de la digue
	7	Type de protection du talus amont de la digue
	8	Type de protection du talus aval de la digue
	9	type de revêtements de la crête de la retenue
	10	Type de déversoir
	11	Type de coursier
	12	Type de murs bajoyers
	13	Type de bassin de dissipation d'énergie
Analyse fonctionnelle	14	Type de conduite de vidange
	15	Destination de la retenue
	16	Fréquence d'entretien
	17	Etat d'envasement de la de la retenue

Chacun des **dix-sept** paramètres sera sanctionné par une note élémentaire Nei . Le principe de notation choisi correspond aux critères d'amplification des notes en fonction de l'accroissement des risques de vulnérabilité. Chaque élément de notation est affecté d'un coefficient Pi de pondération. La note élémentaire Nei de chaque paramètre est comprise entre 1 et 4 : 1 correspond à la situation idéale et 4 à la situation critique avec des notes intermédiaires. Il en est de même des poids de pondération Pi dont les valeurs varient de 1 à 4 : 1 pour une pénalisation minimale du paramètre et 4 pour une pénalisation maximale en considérant des situations intermédiaires. Une plage d'évaluation plus large obligerait à plus de finesse dans l'analyse ; ce qui peut donner lieu à des controverses au sein d'un même groupe d'expert qui aurait à analyser un même défaut ou pathologie. Donc, une analyse sur un nombre important de valeurs pose des difficultés de recoupement des classes qualitatives et évite ainsi une divergence d'analyse entre experts. L'expérience du Cemagref, dans le domaine d'évaluation des dégradations des ouvrages hydrauliques a montré qu'une analyse à 4 valeurs est bien adaptée au diagnostic rapide. C'est pour ces raisons énumérées que nous avons adopté une analyse qualitative des états sur quatre valeurs pour les défauts et dégradations (**Hammoum, 2012**).

La note partielle d'un paramètre est alors obtenue par le produit (**$Nei \times Pi$**) et l'indice de vulnérabilité « **I_v** » s'exprime comme la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{17} Nei . Pi \quad (1.1)$$

Pour un critère donné, une grille d'évolution de sa note partielle (**Nei.Pi**) est construite en tenant compte de tous les scénarios possibles. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau (1.3)

Tableau 1.3 : Grille hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre.

		Note élémentaire N_{ei}			
		1	2	3	4
Pondération P_i	1	1	2	3	4
	2	2	4	6	8
	3	3	6	9	12
	4	4	8	12	16

En considérant tous les critères d'analyse énumérés précédemment au nombre de dix-sept, nous proposons la classification suivante, répartie en quatre niveaux de vulnérabilité :

Tableau 1.4 : Classification d'une retenue en fonction de son « I_v ».

Niveau de vulnérabilité	Vert	Orange 1	Orange 2	Rouge
Indice de vulnérabilité I_v	17 - 68	68 - 119	119 - 187	187 - 272

- **Le niveau vert : $17 \leq IV \leq 68$** : la retenue expertisée n'est pas vulnérable. L'ouvrage présente un bon comportement aux aléas naturels et ne nécessite aucune attention particulière après sa réalisation et sa mise en service. Seules les interventions ordinaires périodiques sont nécessaires.

- **Le niveau orange 1 : $68 < IV \leq 119$** : Le comportement aux aléas naturels est assez bon. La retenue est moyennement vulnérable.

- **Le niveau orange 2 : $119 < IV \leq 187$** : La retenue a une tenue et un comportement faible aux aléas naturels. Elle présente une vulnérabilité assez élevée.

- **Le niveau rouge : $187 < IV \leq 272$** : la retenue a une très faible tenue aux aléas donc une vulnérabilité très élevée. Par conséquent, elle doit être mise hors service ou à défaut en situation de restriction d'utilisation, immédiatement.

La limite inférieure du niveau de vulnérabilité verte est déterminée en considérant que tous les paramètres ont un score partiel de 1, donnant : $I_v = 1 \times 17 = 17$

La limite la plus basse du niveau de vulnérabilité orange 1 est déterminée en considérant que tous les paramètres ont un score partiel de 4, donnant : $I_v = 4 \times 17 = 68$.

La limite la plus basse du niveau de vulnérabilité orange 2 est déterminée en considérant que tous les paramètres ont un score partiel moyen de 7, donnant : $I_v = 7 \times 17 = 119$.

La limite inférieure de niveau de vulnérabilité rouge est déterminée en considérant que tous les paramètres ont un score partiel moyen de 11 donnant : $I_v = 11 \times 17 = 187$.

La limite supérieure du rouge est déterminée en considérant que tous les paramètres ont un score partiel de 16 donnant : $I_v = 16 \times 17 = 272$.

1.9. Application de la méthode de l'indice de vulnérabilité pour l'évaluation de la vulnérabilité des RC du parc de la wilaya de Tizi Ouzou

La méthode décrite dans la section précédente a été testée avec succès sur 13 retenues collinaires de la Wilaya de Tizi-Ouzou, dans les daïras suivantes : Ouacif, Ouadhias, Draa El Mizan et Draa Ben Khedda, en plus des retenues déjà expertisées par (Saradouni, 2012) dans cinq daïras : Bouzeguene, Ouaguenoun, Azazga, Mekla et Azzfoun, pour avoir un total de 40 retenues collinaires.

Pour mettre en application cette méthode, nous avons effectué des sorties sur terrain pendant 4 mois allant de juillet à octobre 2019. Les retenues que nous avons expertisées sont de type homogène, réalisées en remblai compacté. Les renseignements concernant leurs caractéristiques et la date de leur mise en service sont consignés sur le tableau 1.5. Notons que ces données sont tirées des documents techniques de la Direction des Ressources en Eau de la wilaya de Tizi Ouzou (DRE).

Tableau 1.3 : Présentation des retenues expertisées (Djeme et Haouili, 2019)

Région d'étude (Daïra)	Nom de la retenue	Hauteur de la digue en (m)	Capacité en 103(m3)	Année de mise en service
Ouadhias	A.GUEHRENE N°270	9	60 000,00	1985
	TIZI N'TLATA N°300	9	60 000,00	1989
Ouacif	AIT TOUDERT N°169	9	45 000,00	1987
	AIT TOUDERT N°170	8	50 000,00	1988
	AIT TOUDERT N°171	12	60 000,00	1989
	AIT TOUDERT 172	10	50 000,00	1989
	DRAA BEN KHEDDA N°415	11	100 000,00	1988
DRAA BEN KHEDDA	SIDI NAAMANE N°421	8	100 000,00	1986
	SIDI NAAMANE N°428	9	100 000,00	1985
	TIRMITINE N°401	9	70 000,00	1987
	TIRMITINE N°402	8	115 000,00	1985
	TIRMITINE N°412	7	35 000,00	1985
DRAA EL MIZAN	DRAA EL MIZAN N°260	8,5	35 000,00	1986

Une fiche d'enquête a été renseignée pour chaque retenue collinaire expertisée (annexe 1). Ces fiches d'enquêtes établies par Saradouni en 2012 et reprises par Gueddoun et Mostefai en 2018, contiennent les quatre parties principales suivantes :

- **La fiche descriptive de l'ouvrage** : dans cette partie, on retrouve les renseignements généraux de la retenue : le nom, la localisation ou l'adresse, la typologie, l'âge, les caractéristiques hydrauliques et géométriques ainsi que les propriétés de l'ouvrage de vidange.
- **La fiche d'évaluation environnementale** : on y trouve l'implantation de l'ouvrage (en montagne, vallée, région côtière...), le type de sol (rocheux, ferme, meuble...), la zone sismique, l'action de la neige et l'action du vent.
- **La fiche d'évaluation structurelle** : cette partie regroupe les informations sur le type, l'état et la qualité des éléments de la structure : la digue, les talus amont et aval, la crête de la retenue, l'ouvrage de vidange et l'évacuateur de crue (déversoir, coursier et bassin de dissipation).
- **La fiche d'évaluation fonctionnelle** : dans cette dernière partie, on trouve les informations relatives à l'usage de l'ouvrage et à son entretien.

Une fois le questionnaire renseigné, l'indice de vulnérabilité (I_v) est calculé sur la base des **dix-sept** paramètres. Celui-ci permettra de classer la retenue expertisée au niveau de vulnérabilité correspondant (vert, orange1, orange2 ou rouge), conformément à la grille de classification proposée (tableau 1.4). Un détail du calcul de l'indice de vulnérabilité I_v est présenté pour le cas de la retenue collinaire Ait Toudert N°171 dans ce qui suit :

- **Retenue collinaire Ait Toudert N°171**

La retenue collinaire Ait Toudert N°171 est située au nord-ouest du chef-lieu de la commune Ait Toudert, cette retenue est classée de type des petits barrages avec une hauteur de la digue 12 m. La capacité de la cuvette est de 60 000.00 m³, a été réalisée par DHW en 1989.



Figure 1.6 : Vue générale de la retenue Ait Toudert N°171

Les désordres observés sur la retenue, après expertise visuelle, sont :

❖ **Au niveau de la crête**



Figure 1.7 : Présence de fissures sur la crête



Figure 1.8 : Affaissement de la crête.

❖ **Au niveau du talus amont**



Figure 1.9 : Présénescence de végétation arbustive

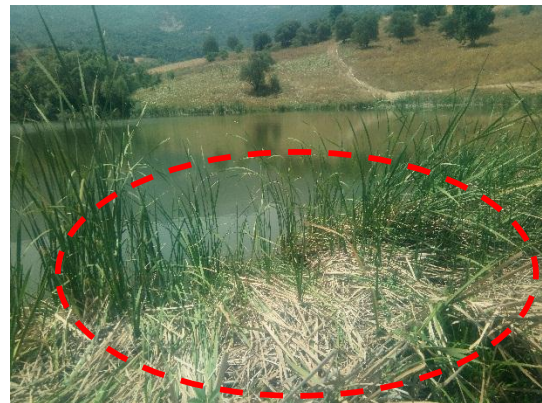


Figure 1.10: Présence de hautes herbes

❖ **Au niveau de talus aval**



Figure 1.11 Erosion interne du talus aval



Figure 1.12: Végétation arbustive sur le talus aval



Figure 1.13: Glissement du talus aval de la retenue

❖ Au niveau de l'évacuateur de crues



Figure 1.14 : Obturation de l'évacuateur de crue
Par la végétation



Figure 1.15 : Glissement de terrain sur les murs bajoyers
de l'évacuateur

❖ Au niveau du coursier et des murs bajoyers



Figure 1.16 : Ruine des bajoyers au niveau de coursier



Figure 1.17: Ouverture du joint de rupture des bajoyers



Figure 1.18: Glissement de terrain sur les bajoyers de coursier

❖ Au niveau de bassin de dissipation



Figure 1.19 : Présence de fissures sur le bassin de dissipation



Figure 1.20: Détérioration des murs bajoyers du bassin de dissipation

Après calcul de l'indice de vulnérabilité (Tableau 7), il apparaît que la retenue d'Ait Toudert est classée au niveau orange 2 ($I_v = 145.5$), autrement dit la retenue en question a un comportement faible aux aléas naturels.

Tableau 1.4 : Indice de vulnérabilité au jour d'expertise en 2019.

Evaluation	Critère de notation	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei x Pi
Environnement	Implantation de la retenue	vallées et pleine	2	climat semi-aride	2	4
	Zone sismique	zone II a	2	milieu rural	2	4
	Type de sol	sol très meuble	4	risque de glissement de terrain	4	16
	Zone de neige	zone A	4		1	4
	Zone de vent	zone I	2	ph=0,75 pc=0,50 pt=0,75 Ps=0,75	2,75	5,5
Structurelle	Etanchéité du corps de la digue	digue homogène en argile compactée	1	talus sec	1	1
	Type de protection du talus amont de la digue	enrochement	1	présence de végétation	2	2
	Type de protection du talus aval de la digue	talus non protégé	4	présence des glissements	4	16
	Type de revêtement de la crête de la retenue	sans protection	4	présence de la végétation, des fissures, tassement de la crête	8	32
	Type de déversoir	déversoir latérale sur rive à seuil en béton	2	présence d'obstacles	4	8
	Type de coursier	béton armé/béton	1	présence de végétation	6	6
	Type de mur bajoyer	béton armé/béton	1	rupture de joints et perte de stabilité	7	7
	Type de bassin de dissipation d'énergie	béton armé/béton	1	déformation de la structure déplacement des enrochements et ruine	9	9
Fonctionnelle	Type de conduite de vidange	conduite en acier noire	4	non fonctionnelle	4	16
	Destination de la retenue	eau pour l'irrigation	1	accessible par route carrossable	2	2
	Fréquence d'entretien	absence d'entretien	4	aucun risque	1	4
	Etat d'envasement de la retenue	talweg (ruissellement)	3	20 à 30 ans	3	9
Indice de vulnérabilité					145,5	

Niveau de vulnérabilité	Vert	Orange 1	Orange 2	Rouge
Indice de vulnérabilité I_v	17 - 68	68 - 119	119 - 187	187- 288

Indice de vulnérabilité au jour de l'expertise en 2019 $I_v = 145.5$

Par procède analogue, nous avons déterminé l'indice de vulnérabilité I_v des 13 retenues du parc que nous avons expertisé. Les résultats sont données dans le tableau (1.5) pour toutes les retenues expertisées à ce jour, y compris celles expertisées par Saradouni 2012 et Gueddoun-Mostefai 2018.

Tableau 1.5 : Résultats de l'indice de vulnérabilité des retenues collinaires expertisés

communes et nu de la retenue	RC	code	Note partiel x coefficient de pondération Pi																	Iv
			Environnementale					Structurale							Fonctionnelle					
			Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action de vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien	
A.GUEHRENE	270	1	4	4	16	4	5	2	2	8	3	2	1	1	1	16	3	12	4	88
AIT TOUDERT	169	2	4	4	24	4	5	1	2	16	9	8	5	3	3	16	2	12	4	122
AIT TOUDERT	170	3	4	4	16	4	4	1	2	8	4	8	1	3	1	16	4	12	4	96
AIT TOUDERT	171	4	4	4	16	4	5,5	1	2	16	32	8	6	7	9	16	2	9	4	145,5
AIT TOUDERT	172	5	4	4	16	4	5,5	1	2	8	3	14	1	3	4	16	2	9	8	104,5
AZEFFOUN N° 10	DHW (1987)	6	12	4	16	4	3	3	2	16	8	8	3	4	4	16	2	9	4	118
AZEFFOUN N° 11	DHW (1987)	7	12	4	16	4	4,5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	12	119,5
AZEFFOUN N° 12	DSA (1988)	8	12	4	16	4	5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	8	116
AZEFFOUN N° 14	DHW (1995)	9	12	4	16	4	4,5	3	3	8	8	4	3	4	4	16	2	6	4	105,5
AZEFFOUN N° 15	DHW (1995)	10	12	4	16	4	3,5	3	6	8	16	8	3	3	4	16	2	6	16	130,5
BOUZEGUENE n°2	DSA	11	4	2	12	4	6,5	3	2	4	6	8	3	3	3	16	2	6	8	92,5
BOUZEGUENE n°3	DSA	12	4	2	12	4	6,5	2	2	2	12	8	4	2	4	16	2	6	8	96,5
DRAA BEN KHEDDA	415	13	4	4	16	4	6	1	2	16	12	2	4	7	4	4	4	12	8	110
DRAA EL MIZAN	260	14	4	4	16	4	4,5	1	2	8	4	2	1	1	1	16	3	12	24	107,5
FREHA 389	DHW (1986)	15	6	8	12	4	6	1	2	16	16	8	4	4	4	16	2	3	12	124
FREHA 395	DHW (1988)	16	6	4	12	4	5	3	2	8	3	4	3	1	2	16	3	4	9	89
FREHA 396	DHW (1989)	17	6	4	12	4	5	4	4	16	16	8	16	16	16	16	2	3	8	156
FREHA 397	DHW (1989)	18	6	8	12	4	6	1	2	8	3	4	1	4	6	16	3	8	12	104
FREHA 398	DHW (1988)	19	6	8	12	4	6	3	4	16	16	4	12	12	12	16	3	9	6	149

ILOULA OUMALOU N° 399	DHW (2000)	20	4	2	12	4	6,5	2	2	3	9	8	4	3	4	16	2	6	8	95,5
ILOULA OUMALOU N° 1	DSA (2000)	21	4	4	4	4	6	2	3	12	16	4	2	3	4	16	2	6	8	100
MEKLA 367	DHW (1986)	22	6	2	6	4	4,5	3	2	2	8	8	4	4	4	16	2	9	12	96,5
MEKLA 368	DHW (1987)	23	6	2	12	4	4,5	4	2	4	8	2	2	3	3	16	2	9	12	95,5
MEKLA 391	DHW (1989)	24	6	2	12	4	4,5	4	12	16	16	4	16	12	12	16	2	9	12	159,5
MEKLA 393	DHW (1986)	25	6	4	12	2	4	1	2	8	3	4	1	1	1	16	2	6	12	85
MEKLA (chaoufa) 394	DHW (1986)	26	6	4	12	2	5	3	2	8	6	6	9	16	12	12	2	8	8	121
OUAGUENOUN 360	360	27	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	6	3	137
SIDI NAAMANE	421	28	4	2	12	4	5	1	2	8	3	16	2	2	1	16	2	20	12	112
SIDI NAAMANE	428	29	4	2	2	4	5	1	2	8	4	1	4	9	4	16	2	8	28	104
SOUAMAA N°2	DSA (1999)	30	6	4	4	4	4,5	2	2	16	8	6	2	3	2	16	2	6	12	99,5
TIMIZART 201	DHW (1988)	31	6	4	6	4	4,5	2	4	4	16	4	12	12	16	16	2	9	8	129,5
TIMIZART 363	DHW (1988)	32	6	4	12	4	5	1	2	8	3	4	1	4	2	4	2	8	9	79
TIMIZART 366	DHW (1986)	33	6	4	6	4	4,5	1	2	8	6	2	1	1	1	16	2	12	12	88,5
TIMIZART 388	DHW (1986)	34	6	4	6	4	4,5	1	8	8	12	4	1	1	3	4	2	4	12	84,5
TIMIZART 360	DHW (1988)	35	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	3	6	137
TIMIZART	DHW (2000)	36	6	4	6	4	4,5	2	4	4	6	6	3	2	4	16	2	3	8	84,5
TIRMITINE	401	37	4	4	12	4	5,5	1	2	4	12	18	4	2	4	16	1	8	12	113,5
TIRMITINE	402	38	4	2	6	4	4	1	2	16	3	4	4	2	4	16	3	8	12	95
TIRMITINE	412	39	4	2	12	4	4,5	1	2	4	8	2	1	1	2	16	1	8	12	84,5
TIZI NTLATA	300	40	4	4	16	4	5	1	2	8	32	2	1	1	1	16	3	12	20	132

1.10. Pathologies rencontrées sur les retenues collinaires expertisées du parc de la wilaya de Tizi-Ouzou

Le manque d'entretien et de surveillance exposent les retenues collinaires aux menaces naturelles (neige, séismes, vents, feux...) et affecte les digues et leurs ouvrages annexes, qui se révèlent par des indices de surface : végétation, glissement de terrain, érosion, effondrement des ouvrages annexes. Le diagnostic et l'inspection visuelle constitue le meilleur moyen de repérer ces pathologies et s'avère incontournable pour prévenir la rupture de ces ouvrages et envisager les confortements adaptés. Dans ce qui suit, nous présentons les différentes pathologies que nous avons rencontrées lors de notre expertise du parc de retenue collinaire de la wilaya de Tizi-Ouzou ainsi que quelques recommandations pour leur réhabilitation.

a- Présence de la végétation

Dans toutes les retenues expertisées, nous avons constaté la présence de la végétation (herbes hautes, arbres, arbrisseaux) autour de la retenue, sur la crête de la retenue et sur le talus amont et aval de la digue, cela est un résultat d'absence d'entretien périodique de la retenue.

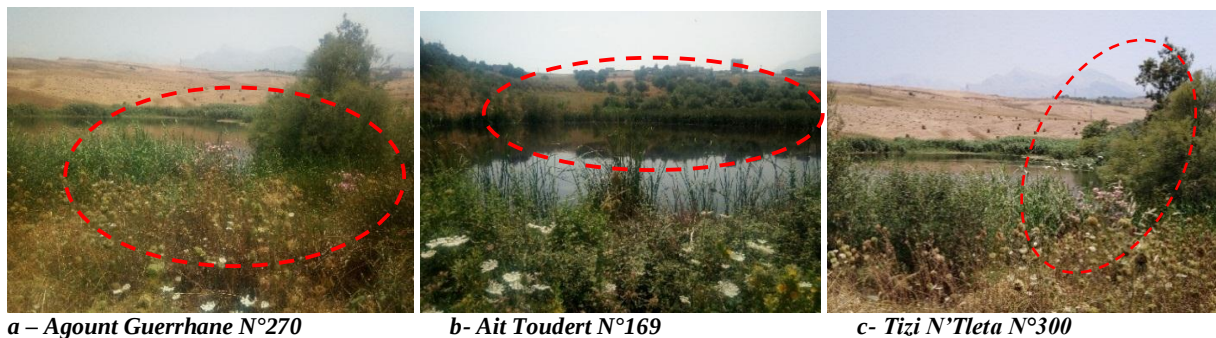


Figure 1.21: Présence de végétation autour de la retenue (Djema et Haouili, 2019).

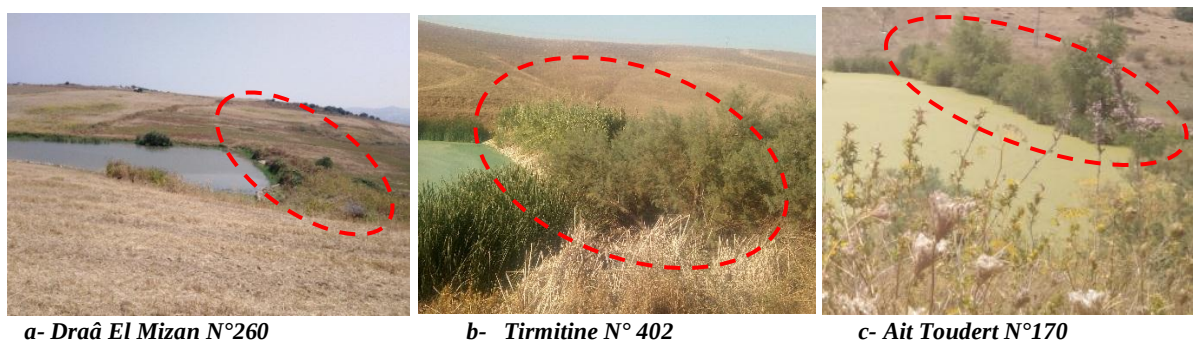


Figure 1.22: Présence de végétation sur la crête de la retenue (Djema et Haouili, 2019).

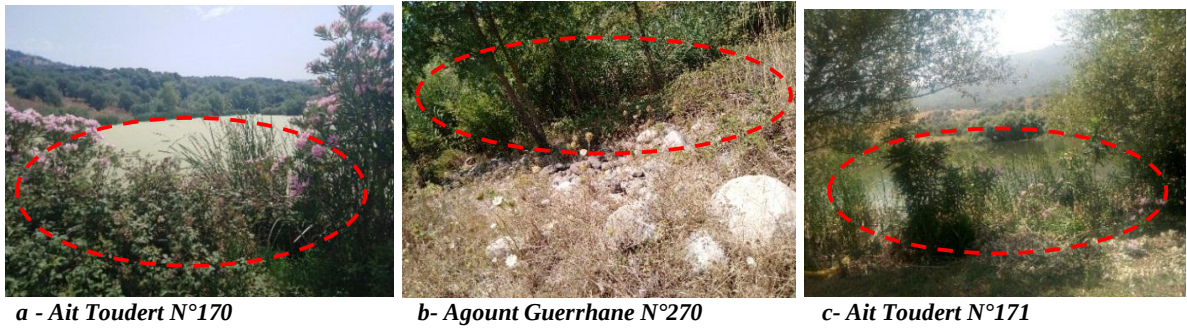


Figure 1.23 : Présence de végétation arbustives sur le talus amont de la retenue (Djema et Haouili, 2019).

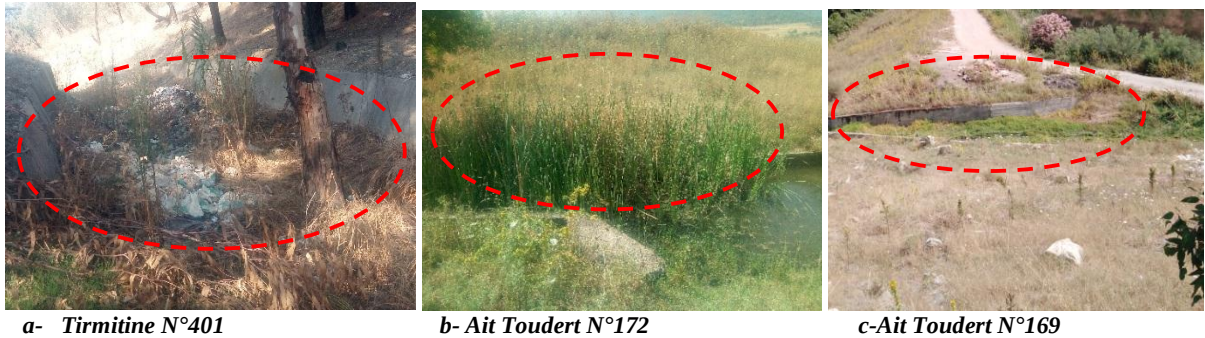


Figure 1.24: Obturation de l'évacuateur de crue par la végétation (Djema et Haouili, 2019).

◆ Les réparations possibles

- Pour une végétation arbustive avec des racines peu développées, procéder à coupe systématique des brins et accompagner de produits chimiques dévitalisant afin de tuer les sujets.
- Si la végétation est arborescente épars ou dense, il est recommandé : l'abattage des arbres, le dessouchage et l'extraction des couches de terre végétales.

b- Présence de fissures

Des fissures localisées et situées sur la crête sont visibles sur les retenues expertisées. Ces fissures sont de l'ordre de 2 à 3 cm d'ouverture et plusieurs décimètres de profondeur. Elles ont origine des tassements du corps de remblai et peuvent être un indice d'amorce de glissement du talus.

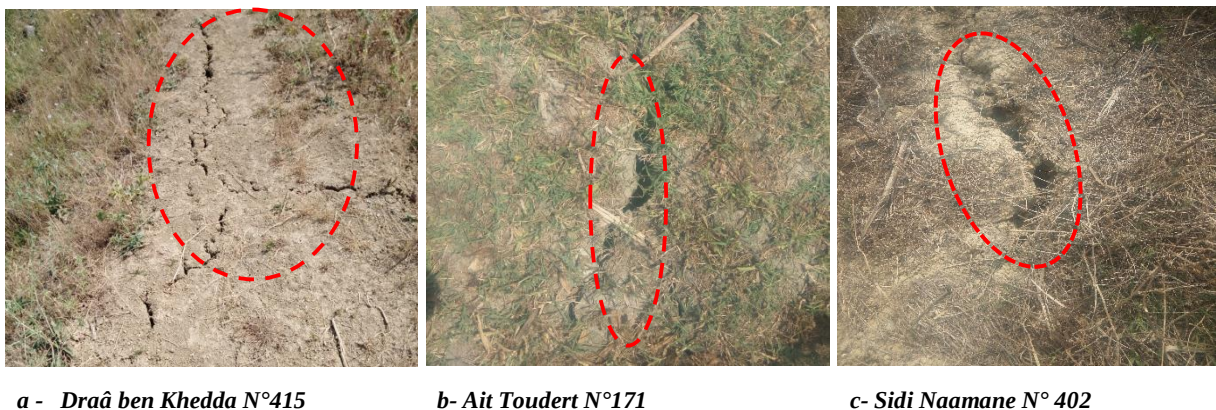


Figure 1.25: Présence des fissures sur la crête (Djema et Haouili, 2019).

♦ Les réparations possibles

- Quand les fissures ne concernent que la couche de revêtement, constituée probablement de matériaux trop plastiques ou compacté dans de mauvaises conditions, il faut procéder à un rechargement ou un simple compactage complémentaire, après arrosage.
- Si les fissures dépassent 0.5 – 1 m elles doivent être considérées comme dangereuses, car elles peuvent être à l'origine de fuites et de renard lorsque la retenue atteint son niveau le plus élevé. La réparation doit alors s'orienter vers la réfection complète de toute la tranche de remblai affecté par ce phénomène.

c- Erosion interne

L'érosion interne est un processus qui implique des arrachements de particules et leur transport dans la digue par un écoulement hydraulique souterrain dans le sol. Elle peut conduire à l'instabilité de l'ouvrage : une modification des caractéristiques mécaniques et hydrauliques du matériau constituant l'ouvrage, et notamment la perméabilité.



a- Ait Toudert N°171



b- Draâ ben Khedda N°415

Figure 1.26: Corps de la digue endommagé par l'érosion interne (Djema et Haouili, 2019).

♦ Les réparations possibles

Deux techniques différentes sont employées suivant le cas :

- L'utilisation du masque drainant pour les cas où un élargissement de la digue est possible du masque est disposée sur le talus coté terre. Il est constitué par une couche de matériaux drainants et filtrants issus du criblage des sables et graviers.
- Pour le cas où l'intervention sur les talus est problématique, une paroi étanche est utilisée, c'est une paroi en bentonite-ciment exécutée à la pelle ou à la trancheuse.

d- Présence de glissement

Des glissements du sol sont observés au niveau des parements amont et sur les berges des murs bajoyers. Ce phénomène est dû à une migration de particule engendrée par un écoulement superficiel dans un sol à cause d'une mauvaise étanchéité du corps.

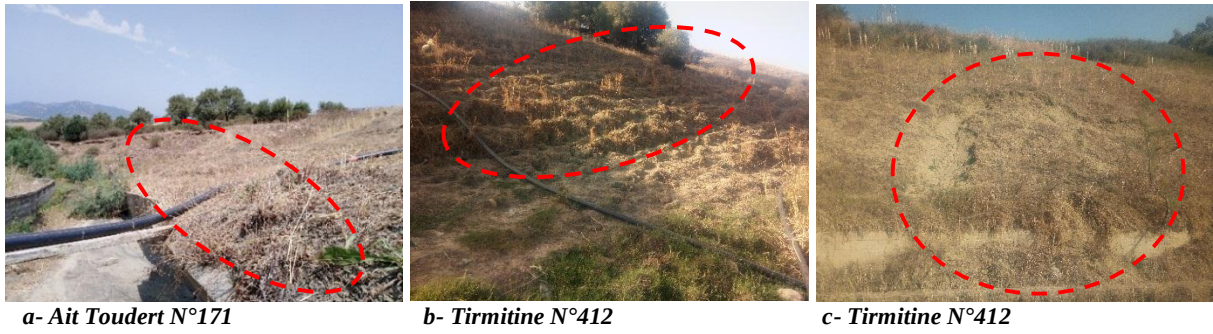


Figure 1.27 : Glissement de terrain (Djema et Haouili, 2019).

◆ Les réparations possibles

- Un diagnostic approfondi des causes du désordre doit être fait par un spécialiste qui déterminera également les travaux de confortement à entreprendre.
- Enherbement- mise en place d'enrochement, blocs préfabriqués, gabions ou Matelas Reno.

e- Ouverture et rupture du joint au niveau du coursier et bajoyers

Des ouvertures constatées au niveau des joints sont observées pouvant atteindre des dimensions de plus de 25 cm, due au glissement de terrain et des tassements différentiels.

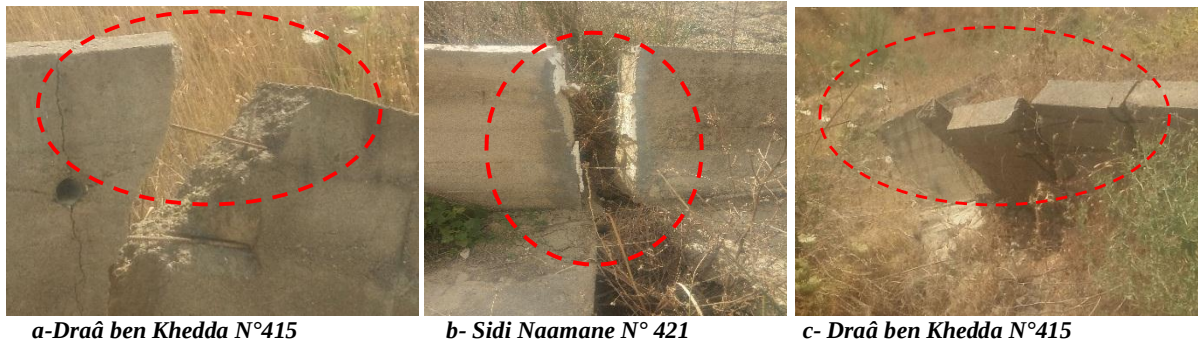


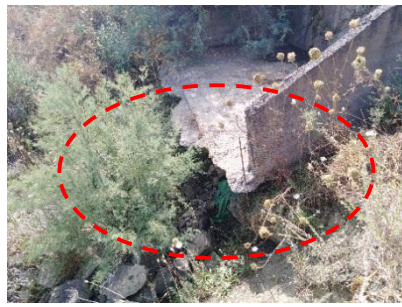
Figure 1.28: Ruine et rupture du joints au niveau du coursier et bajoyers Djema et Haouili 2019).

◆ Les réparations possibles

- Des travaux de jointement et d'enlèvement de la végétation sont à conseiller dans le cas des bajoyers en maçonneries.
- Réparation des murs bajoyer à l'aide de la résine dans le cas des bajoyers en béton.
- Mise en place des murs en gabion en cas d'endommagement.

f- Effondrement et détérioration des bassins de dissipation

Des dissipateurs d'énergie en béton armé des retenues expertisées ont subi des translations par la force des courants d'eau et glissement de terrain. Les joints de rupture entre le dissipateur et le coursier se sont largement ouverts sur une largeur de plus de 35 cm. L'érosion est visible en aval des dissipateurs, cette érosion à moyen terme risque de progresser pour toucher le coursier.



a- Ait Toudert N°172



b- Draâ ben Khedda N°415



c- Sidi Naamane N°421



d- Tirmatine N°402

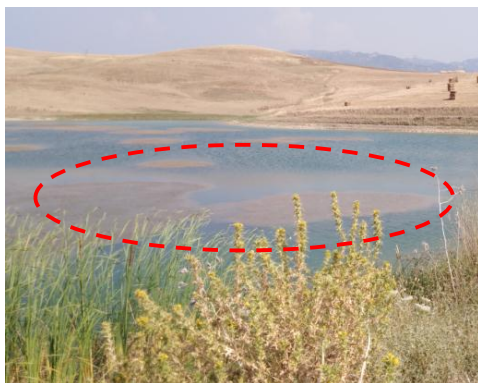
Figure 1.29 : Effondrement et détérioration des bassins de dissipation (Djema et Haouili, 2019).

◆ Les réparations possibles

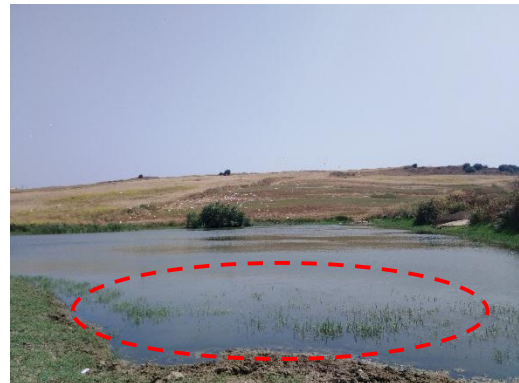
- Lorsqu'un dissipateur d'énergie est incorrectement dimensionné, des érosions peuvent être présentes, ce phénomène d'érosion peut être dangereux dans une digue en remblai dont le pied peut être érodé, entraînant alors un début de glissement. Le radier du dissipateur bétonné peut être érodé ou soulevé en cas de très forte crue ou manœuvre d'une vanne. donc un contrôle technique est nécessaire après chaque crue.

g- Envasement de la retenue

Envasement de la cuvette qui est liée à la décantation des sédiments au fond de la cuve sur quelques retenues expertisées. Il est nécessaire de faire un suivi régulier des apports solides pour un éventuel dévasement



a- Draâ ben Khedda N°415



b- Draâ El Mizan N°260

Figure 1.30 : Envasement de la cuvette (Djema et Haouili 2019).

♦ Les réparations possibles

La prévision de l'envasement est une étape indispensable pour tout projet de faisabilité d'un barrage. Le suivi régulier des apports solides dans un barrage est nécessaire pour un éventuel dévasement de la retenue. Une telle opération nécessite des mesures bathymétriques périodiques. Afin de pré visualiser le niveau d'envasement de la retenue.

h- Corrosion des vannes de vidange

Le diagnostic de l'état des vannes des vidanges a montré que toutes les vannes sont exposées à l'aire libre et sans protection, d'où leur état vétuste (corrosion) et dégradé (**photos 1.25**)



a-Tirmitine N°401

Figure 1.31: Vanne rouillée (Djema et Haouili 2019).

♦ Les réparations possibles

- Les vannes de vidange doivent être essayées au moins une fois par an car il s'agit d'un organe de sécurité de l'ouvrage. Cependant si une vanne est restée inopérante pendant de nombreuses années, l'essai d'ouverture doit être fait avec précaution.
- Une ouverture totale de la vidange, plusieurs fois par an, en période de fort débit de la rivière est recommandée car elle permet une chasse des sédiments autour de la prise d'eau et prévient ainsi le risque de blocage des vannes par envasement.

Conclusion

La méthode de diagnostic et d'expertise appliquée dans ce chapitre, a permis une évaluation simple et rapide de la vulnérabilité des retenues collinaires du parc de la wilaya de Tizi-Ouzou. En bureau d'étude, cette méthode présente aux ingénieurs un outil d'aide à la gestion et à la décision (réhabilitation ou restriction de service) des retenues collinaires en exploitation.

Pour une analyse plus poussée des paramètres de cette méthode de diagnostique, et afin d'éviter la redondance et de ressortir les paramètres prépondérants dans le calcul de l'indice de vulnérabilité, nous proposons une méthode statistique dite ACP « Analyse en composantes principales », pour définir les liaisons (corrélations) existantes entre ces différents paramètres.

Chapitre 2
Exposé de la méthode
ACP

Introduction

Il existe plusieurs méthodes multifactorielles comme (l'ACP, l'AFC, l'ACM...) qui permettent la traduction d'information à partir de tableau de données à des représentations graphiques, et dans le cadre de cette étude nous nous basons sur la méthode ACP, qui est apparue dans les années 30, et développée en France dans les années 60 après l'avènement des premiers ordinateurs, cette méthode fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles. Ayant un champ d'application très vaste en regroupant différents domaines de recherche (biologique, économique, social et traitement d'image... etc.). Cette méthode est la plus favorable pour l'analyse des 17 paramètres vu précédemment dans le 1^{er} chapitre. Afin de définir les corrélations existantes entre ces derniers pour éviter la redondance à l'échelle d'un parc de retenues collinaire expertisé, celle-ci nous permettra de ressortir les ressemblances existantes entre les différents individus (retenues collinaire) ainsi que les liaisons entre les paramètres.

Les logiciels utilisant la méthode ACP sont : R, XLSTAT, Stat Box, SPSS. Ils permettent de réaliser diverses analyses factorielles.

2.1. Définition de l'ACP

L'analyse en composantes principales (ACP) fait partie du groupe de méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. L'ACP propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de p variables quantitatives pour n unités appelées aussi individus, des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage. Les domaines d'utilisation de l'ACP sont très étendus, on peut nommer : bio statistique, marketing, sciences sociales et bien d'autres domaines.

L'ACP consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables décorréelées les unes des autres. Ces nouvelles variables sont nommées composantes principales ou axes principaux. Elle permet au praticien de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante.

2.2. Démarche de l'ACP

Il existe plusieurs approches différentes de l'ACP, mais toutes s'accordent sur les conditions de son application et son objectif général, appliqué aux ensembles de données quantitatives d'au moins deux variables. Puisqu'il s'agit d'une méthode d'analyse de données multifactorielle, son but est de résumer cet ensemble de données. Ceci se fait selon les modalités suivantes :

- ✓ fournir des outils simples et lisibles de représentation des informations traitées, permettant de faire ressortir des données brutes les éventuels liens existant entre les variables (en terme de corrélation),
- ✓ donner des indications sur la nature, la force et la pertinence de ces liens, afin de faciliter leur interprétation et découvrir quelles sont les tendances dominantes de l'ensemble de données,
- ✓ réduire efficacement le nombre de dimensions étudiées (et ainsi simplifier l'analyse), en cherchant à exprimer le plus fidèlement possible l'ensemble original de données grâce aux relations détectées entre les variables.

2.3. Données d'une ACP (Hussen et al, 2009)

L'ACP vise à décrire graphiquement un tableau de données d'individus n avec leurs variables quantitatives p de grande taille. Ce tableau sera résumé par la suite en une matrice à n lignes réels et p colonnes (formule (2.1)) :

Tableau 2.1: représentation d'un type tableau de données ACP

Individus \ Variables	Var ₁ Var _i Var _p
Ind ₁	
:	
Ind _i	
:	
Ind _n	

$$\Rightarrow X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Les lignes et les colonnes du tableau de données peuvent être interprété géométriquement par des points dans deux espaces différents ; **l'espace des individus** et **l'espace des variables**.

2.3.1. L'espace des individus

Dans l'espace des individus, chaque individu est représenté par un point et l'ensemble constitue un nuage de points. Etudier ces individus revient à considérer ce nuage de point dans un espace à R^p avec p le nombre de variable (figure 2.1).

Le but de l'ACP est de visualiser ce nuage dans un espace de faible dimension le plus fidèlement possible.

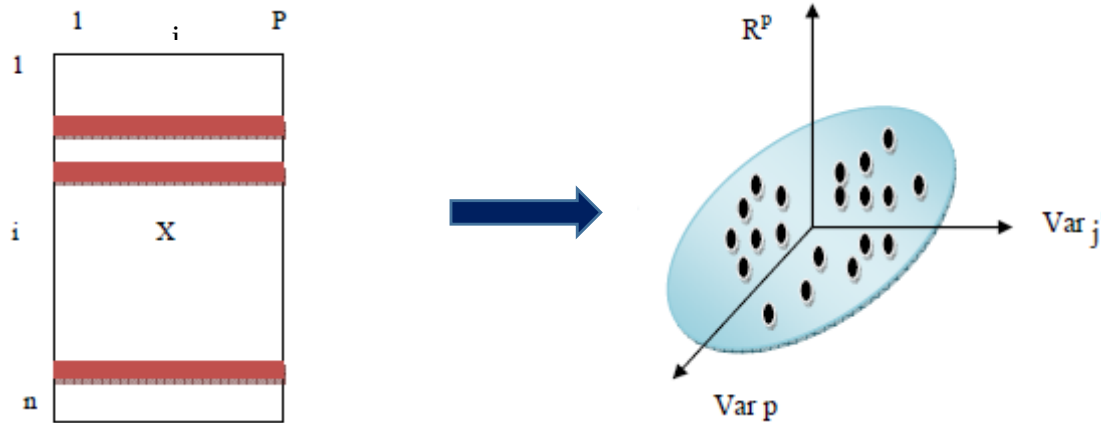


Figure 2. 1 :l'espace des individus (Hussen, 2009)

Nous identifierons l'individu i avec le point ligne $x_i = (x_{i1} \dots \dots, x_{ip})$ qui sera considéré comme un point dans un espace affine (l'espace des individus) à p dimension.

L'analyse du nuage des individus utilise la notion fondamentale de distance, donc pour la représentation géométrique, on choisit une distance entre deux points de l'espace.

Chaque individu est défini par une ligne du tableau qui sera représenté par un point dans un espace à p dimensions.

- Si $j=1$: on a une représentation axiale ;
- Si $j=2$: on peut construire un nuage avec la régression simple ;
- Si $j=3$: on peut avoir une représentation plus difficile en 3 dimension ;
- Si $j=4$: impossible à représenter mais le concept est simple ; on doit définir la notion de ressemblance (mais on peut jouer sur n'importe quelle indice de variable dans la limite des trois dimensions spatiales imposées).

On peut dire que deux individus se ressemblent s'ils sont proches, et dans le cas de l'ACP cette ressemblance est mesuré par la distance euclidienne classique dans un espace R^p à p dimensions ou sont représenté les unités.

La distance euclidienne entre deux individus e_i et $e_{i'}$ (figure 2.3) s'écrit :

$$d^2(e_i, e_{i'}) = \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad (2.2)$$

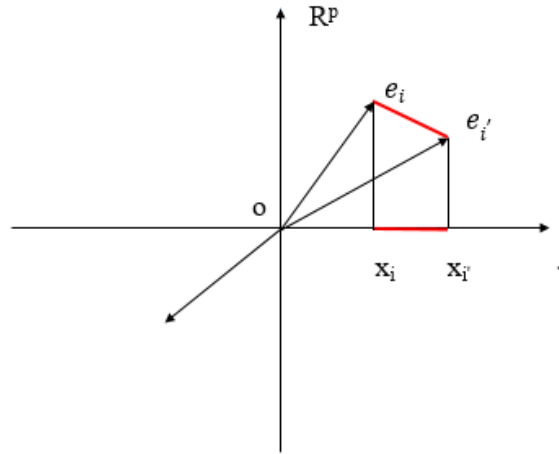


Figure 2. 2 : nuage des individus (Hussen et al, 2009)

Deux point sont très proche si les p coordonnées de ces deux point sont très proche (même valeur pour ces différentes variables).

2.3.2. L'espace des variables

Dans cet espace, les axes représentent les individus et les variables sont représentés comme un nuage de points d'un ensemble de variables. Etudier ces dernières revient à considérer ce nuage de points dans un espace a R^n avec n le nombre d'individus (figure 2.4).

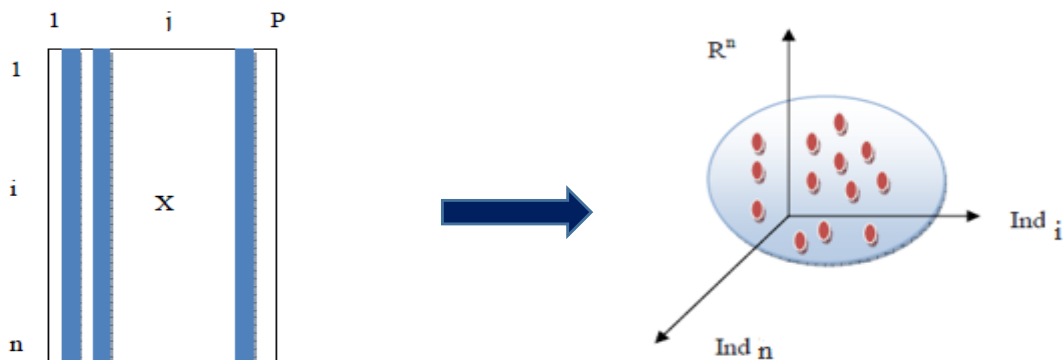


Figure 2. 3 : l'espace des variables (Hussen, 2009)

Si les valeurs prises par deux variables sont très voisines pour l'ensemble des individus, ces variables seront représentées par des variables très proches (ce qui peut signifier que les variables mesurent la même chose ou encore qu'elles sont liées par une relation particulière).

Pour chaque variable aléatoire j on définit sa moyenne par :

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (2.3)$$

Et son écart type par :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad (2.4)$$

Ainsi on peut définir la corrélation entre les variables qui nous amène à étudier la forme du nuage.

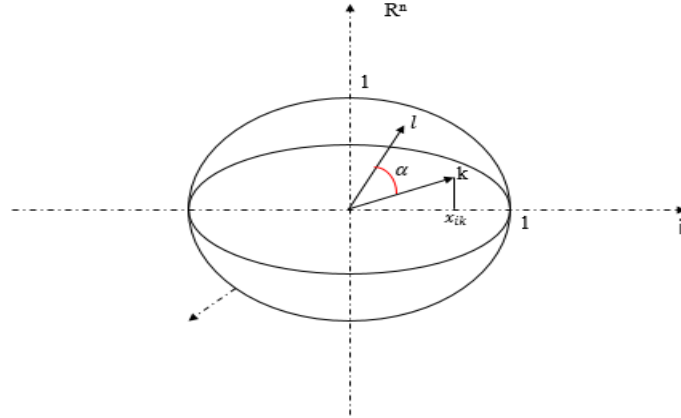


Figure 2. 4 : nuage des variables (Hussen et al, 2009)

Le cosinus de l'angle formé par deux variables (figure 2.5) est égal au coefficient de corrélation linéaire entre ces variables :

$$\cos(\alpha) = \frac{(\vec{ol}, \vec{ok})}{\|\vec{ol}\| \|\vec{ok}\|} = \frac{\sum_{i=1}^p x_{il}^j x_{ik}^j}{\sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{il}^j)^2 \sum_{j=1}^p (x_{ik}^j)^2}} = r(x_i^j x_{i'}^j) \quad (2.5)$$

Tout en sachant qu'un coefficient de corrélation entre deux variables x et y est égale à :

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x)}\sqrt{\text{var}(y)}} = \cos(x, y) \quad (2.6)$$

2.4. Représentation graphique

2.4.1. Représentation des individus

Pour cette représentation on distingue deux cas :

- ❖ L'ACP est réalisé sur un tableau comportant beaucoup d'individus. Dans ce cas, on ne pourra pas interpréter les positions relatives de tous les individus car le nuage sera tellement dense que l'on n'y verra pas grand-chose. Toutefois, si un individu est atypique (critère de ressemblance), il va ressortir du nuage et on pourra alors l'identifier pour éventuellement le supprimer et effectuer un nouveau passage sans cet individu. Dans ce cas, on a souvent recours à une méthode de classification automatique afin de regrouper les individus qui sont proches les uns des autres et ainsi de constituer des type d'individus ayant un comportement similaire.
- ❖ l'ACP est réalisé sur un nombre d'individus plus faible, l'interprétation du nuage des individus est alors possible. Dans ce cas, on n'interprète, sur un plan factoriel déterminé, que les individus qui sont bien représentées.

Sous réserve d'une bonne représentation, la proximité de deux individus sur un plan factoriel est synonyme d'individus ayant un comportement similaire, c'est-à-dire ayant des réponses aux variables de l'analyse qui sont très proches. Si deux individus ont exactement les mêmes valeurs

aux différentes variables, ils seront superposés sur les différents plans factoriels. De même, des individus ou des groupes d'individus s'opposant par rapport à un axe factoriel, s'opposeront par rapport aux variables qui font cet axe.

2.4.2. Représentation des variables

La représentation des variables se distingue par la présence d'un cercle de corrélation. Sur un plan factoriel déterminé, on n'interprète que les variables qui sont bien représentées c'est à dire celles qui sont proches ou sur le cercle de corrélation.

On interprète deux types de positions :

- Les positions des variables par rapport aux axes afin de déterminer quelles sont les variables qui « font les axes ». On va ainsi pouvoir nommer les axes en fonction des variables.
- Les positions des variables les unes par rapport aux autres. Le coefficient de corrélation entre deux variables étant le cosinus de l'angle formé par les vecteurs on en déduit que:
 - ✓ deux variables qui sont proches ou confondu (angle de 0°) sont corrélées positivement (coefficient de corrélation proche de 1),
 - ✓ deux variables opposées (formant un angle de 180°) sont corrélées négativement (coefficient de corrélation proche de -1)
 - ✓ deux variables positionnées à angle droit (angle de 90°) ne sont pas du tout corrélées (coefficient de corrélation égal à 0)

2.5. Problématique

Le problème rencontré avec la méthode ACP est la mise en évidence des relations existante entre les variables des que $p > 3$ et la ressemblance entre les individus des que $n > 3$ car la visualisation deviendra impossible.

La représentation de données en deux dimension (largeur et longueur par exemple) est assez simple (figure 2.6), mais dès qu'on ajoute une troisième dimension (largeur, longueur et hauteur par exemple) la représentation devient plus compliqué (figure 2.7), et au-delà de trois dimension sa deviens impossible.

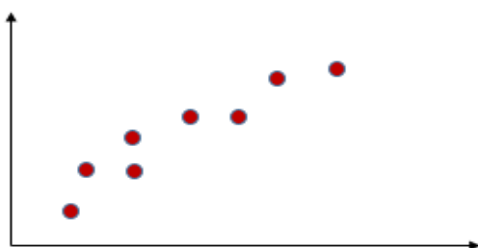


Figure 2. 5: représentation du nuage en 2D

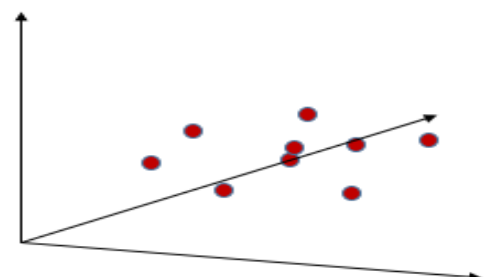


Figure 2. 6: représentation du nuage en 3D

2.6. Solution

Pour remédier au problème rencontré on devra condenser les informations du tableau de manière à retirer les relations vraiment caractéristique (proximité entre variable et individus) tout en limitant la perte d'information. Cela revient à déterminer un nouveau sous espace appelé **espace factorielle du nuage**, de dimension $q < p$ (ou $q < n$) sur le quel projeter les nuages de points relatif au tableau de donnée qui soit compréhensible (de préférence $q = 1, 2$ ou 3) et le moins déformant possible.

2.6.1. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des individus

Un changement de repère p nouveau axe appelée axe factorielle ou axes principaux est défini tout en passant du repère défini par les p variables à un repère de dimension p le moins déformant possible pour le nuage des variables, ensuite on retiendra les q premiers axes du nouveau repère ce qui nous donnera l'espace factorielle de dimension q qui nous permettra de récupérer les liens les plus significatifs contenus dans le tableau.

Les p axes factorielle sont définis séquentiellement :

- ✓ Détermination du premier axe factoriel sur lequel le nuage se déforme le moins en projection.
- ✓ Recherche d'un deuxième axe qui soit orthogonal au premier.
- ✓ Répétition jusqu'à obtention de p axes.

a- Comment obtenir une déformation minimale ?

L'ACP vise à fournir une image simplifiée du nuage de points qui soit la plus fidèle possible, et permet d'avoir une idée sur les distances entre individus cela revient à trouver un sous espace qui résume au mieux les données. Une image est bonne si elle restitue le plus fidèlement possible le nuage original et pour cela il faut que les points soient bien séparés pour bien visualiser les distances entre les individus sans pour autant la perturber.

a.1. Choix de l'origine du nuage d'individus (vecteur moyen ou centre de gravité)

Le point O correspondant au vecteur de coordonnées nulles n'est pas une origine satisfaisante puisqu'il suffit que les coordonnées des points du nuage des individus soient grandes, pour que le nuage s'éloigne de cette origine-là. Pour cette raison il semble plus judicieux de prendre une origine liée au nuage lui-même qui n'est autre que son centre de gravité, ce qui lui permettra d'être plus dispersé.

Après avoir donné le même poids à tous les individus, le centre de gravité G du nuage n'est autre que le point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes des variables :

$$G = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n X_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i1} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{.1} \\ \vdots \\ \bar{x}_{.j} \\ \vdots \\ \bar{x}_{.p} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Comme chaque variable et chaque individu ont le même poids, alors les coordonnées de G dans le repère $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ sont comme suite :

$$\vec{OG} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{.1} \\ \vdots \\ \bar{x}_{.j} \\ \vdots \\ \bar{x}_{.p} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Et sa représentation graphique se présente sous cette forme (figure 2.8) :

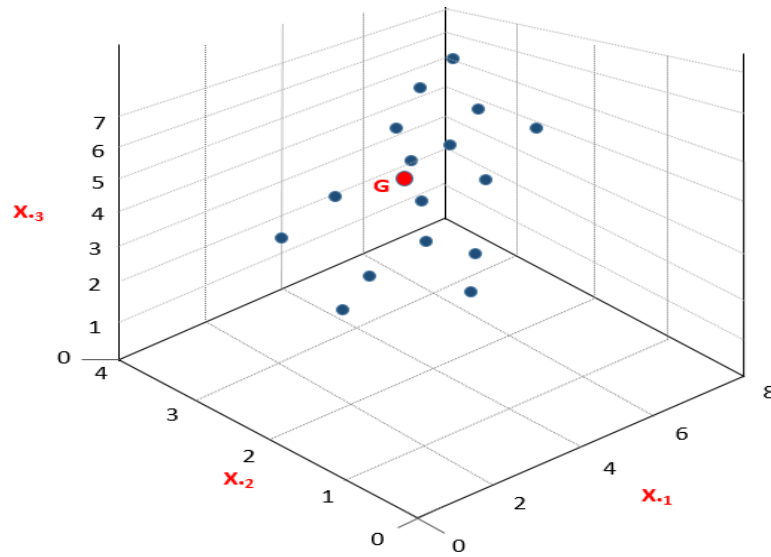


Figure 2. 7: représentation de G dans le repère $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ (Duby et al, 2008).

a.1.2. Détermination de la matrice centrée

Prendre G comme origine nous renvoie à travailler sur le tableau des données centrées tel que :

$$X_c = \begin{bmatrix} x_{11} - \bar{x}_{.1} & \dots & x_{1j} - \bar{x}_{.j} & \dots & x_{1p} - \bar{x}_{.p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} - \bar{x}_{.1} & \dots & x_{ij} - \bar{x}_{.j} & \dots & x_{ip} - \bar{x}_{.p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} - \bar{x}_{.1} & \dots & x_{nj} - \bar{x}_{.j} & \dots & x_{np} - \bar{x}_{.p} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Centrer les données ne modifie pas la forme du nuage mais le translate vers une autre origine qui est son centre de gravité.

La matrice des données centrées contient les coordonnées centrées des individus dans le repère $(G, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ que nous noterons X_{cij} , et nous prendrons $O=G$. sa forme graphique se présente ainsi (figure 2.9) :

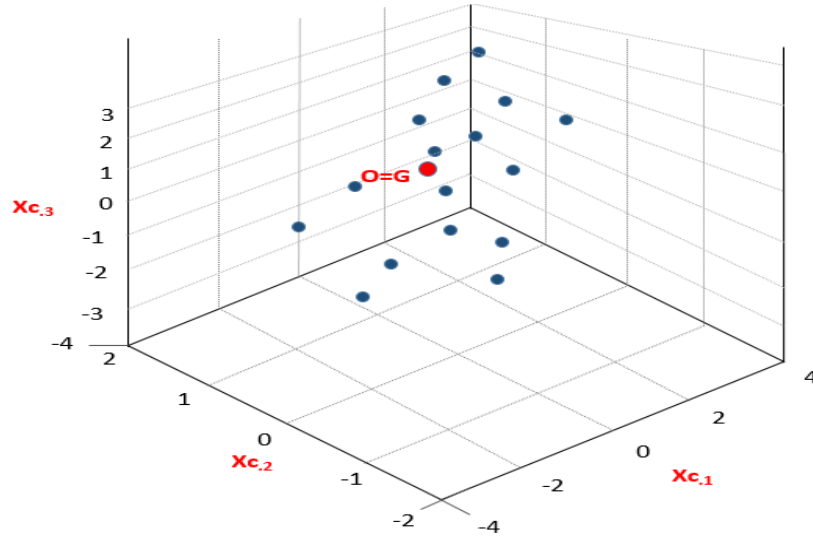


Figure 2. 8: représentation des variables centrées dans le repère $(G, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ (Duby et al, 2008)

a.1.3. La matrice des données centrées réduites

Une variable centrée réduite est la transformée d'une variable aléatoire par une application affine de telle sorte que sa moyenne soit nulle et son écart type $\sigma = 1$.

Réduire une variable consiste à diviser toutes ses valeurs par son écart type et la centrer permet de ramener toutes les colonnes de x à la même origine G .

La matrice des données centrées réduites est donnée par :

$$Y_c = \begin{bmatrix} (x_{11} - \bar{X}_{.1})/\sigma_1 & \dots & (x_{1j} - \bar{X}_{.j})/\sigma_j & \dots & (x_{1p} - \bar{X}_{.p})/\sigma_p \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (x_{i1} - \bar{X}_{.1})/\sigma_1 & \dots & (x_{ij} - \bar{X}_{.j})/\sigma_j & \dots & (x_{ip} - \bar{X}_{.p})/\sigma_p \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (x_{n1} - \bar{X}_{.1})/\sigma_1 & \dots & (x_{nj} - \bar{X}_{.j})/\sigma_j & \dots & (x_{np} - \bar{X}_{.p})/\sigma_p \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Si nous considérons la matrice diagonale $D_{1/\sigma}$ suivante :

$$D_{1/\sigma} = \begin{bmatrix} 1/\sigma & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1/\sigma \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Nous obtiendrons alors :

$$Y_c = X_c D_{1/\sigma} \quad (2.12)$$

a.1.4. La matrice de corrélation

Une matrice de corrélation est utilisée pour évaluer la dépendance entre plusieurs variables en même temps, tout en regroupant leurs coefficients de corrélation. Une des conditions de mise en œuvre de cette matrice est que les variables initiales soient corrélées si non le nombre de dimension ne peut être réduit (on résume ce qui est partiellement redondant et lié). Il faut que la majorité des valeurs de la matrice de corrélation soit proche de 1 en valeur absolues. Plus le nombre d'individus est grand plus les corrélations sont représentatives.

Pour avoir la matrice de corrélation nous devons pré multiplier la matrice de données centrée réduite par sa transposée, on obtient :

$$R = \frac{1}{n} Y_c^t Y_c = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & cor(x_1, x_2) \dots \dots cor(x_1, x_p) \\ cor(x_2, x_1) & 1 \dots \dots cor(x_2, x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cor(x_n, x_1) & cor(x_n, x_2) \dots \dots 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Avec :

$$cor(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) = \frac{cov(x_i, x_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (2.14)$$

La matrice de corrélation se calcule aussi à travers la matrice variance-covariance.

a.1.5. Détermination de la matrice de variance-covariance

Une matrice de variance covariance est une matrice carrée qui comporte les variances et les covariances associées à plusieurs variables. Les éléments de la diagonale de la matrice contiennent les variances des variables, tandis que les éléments hors diagonale contiennent les covariances entre toutes les paires possibles de variables

$$V = \frac{1}{n} X_c^t X_c = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} var(x_1) & cov(x_1, x_2) \dots \dots cov(x_1, x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(x_2, x_1) & var(x_2) \dots \dots cov(x_2, x_p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(x_n, x_1) & cov(x_n, x_2) \dots \dots var(x_p) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Les expressions de la variance et covariance entre deux variables sont données par :

$$var_x = \sigma_x^2 \quad (2.16)$$

$$cov(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{X} \bar{Y} \quad (2.17)$$

La matrice de covariance est une matrice symétrique. Elle est définie positive si les p variables ne sont pas liées linéairement.

Les matrices de covariance et de corrélation sont toutes deux des matrices carrées et symétriques, les variables étant centrées réduites, la variance de chacune vaut 1 ce qui fait que l'inertie totale est égale à p le nombre de variables.

La représentation du nuage de points des données centrées réduites ne modifie rien à la forme de celui-ci, la seule différence entre les deux n'est qu'un changement d'échelle.

Ce qui est intéressant à étudier pour les individus est la distance entre les points. Plus la distance entre deux individus x_i et $x_{i'}$ est grande plus ils seront différents et mieux on pourra les caractériser. Nous choisissons une distance euclidienne autre que la distance euclidienne classique, à savoir :

$$d^2(e_i, e_{i'}) = \sum_{j=1}^p \frac{1}{\sigma_j^2} (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad (2.18)$$

Cette nouvelle distance ne traite plus les variables de façon symétrique, mais elle permet de faire jouer un rôle équitable à chacune d'entre elles.

a.2. Quantification de la qualité de l'image

La quantification de la qualité d'une image se fait avec la notion de dispersion ou de variabilité appelée inertie (la mesure des dispersions) qui est l'équivalent d'une variance mais généralisée à plusieurs dimensions.

Si on a une grande inertie cela voudra dire que le nuage de points est très dispersé, tandis que si elle est faible on pourra déduire que le nuage est concentré sur son centre de gravité.

a.2.1. Calcul de l'inertie totale du nuage des individus

L'inertie est une notion fondamentale en ACP, puisqu'elle est une mesure de la dispersion du nuage de points autour de son centre de gravité g . L'inertie totale du nuage est :

$$I_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(G, u_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (2.19)$$

Remarque : En inversant l'ordre des signes sommes I_G peut s'écrire sous la forme suivante :

$$I_G = \sum_{j=1}^p \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_j)^2 \right] = \sum_{j=1}^p \text{Var}(v_j) \quad (2.20)$$

Où $\text{Var}(v_j)$ est la variance empirique de la variable v_j sous cette forme, on constate que l'inertie totale est égale à la trace de la matrice de variance covariance des p variables v_j :

$$I_G = \text{trace}(V) = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (2.21)$$

Avec λ_i les valeurs propres de la matrice des variances covariance :

$$\det(V - \lambda I) = 0 \quad (2.22)$$

$$tq \quad \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

a.3. Interprétation de l'espace factoriel du nuage de points des individus

Chaque axe factoriel k , de vecteur directeur u_k , représente une nouvelle variable C_k de dimension p , construite comme combinaison linéaire des variables de départ, appelée composante principale. La coordonnée C_{ik} d'un individu i donné sur cet axe factoriel (k) correspond à la valeur de la composante principale prise par cet individu (figure 2.10).

Les composantes principales sont construites de manière à restituer la majeure partie de l'information du tableau, (elles déforment le moins possible l'information). La première composante principale sera une combinaison linéaire des variables de départ de dispersion maximale (celles qui ont la plus grande variance). Les axes qu'elles déterminent sont des axes principaux et les formes linéaires sont des facteurs principaux.

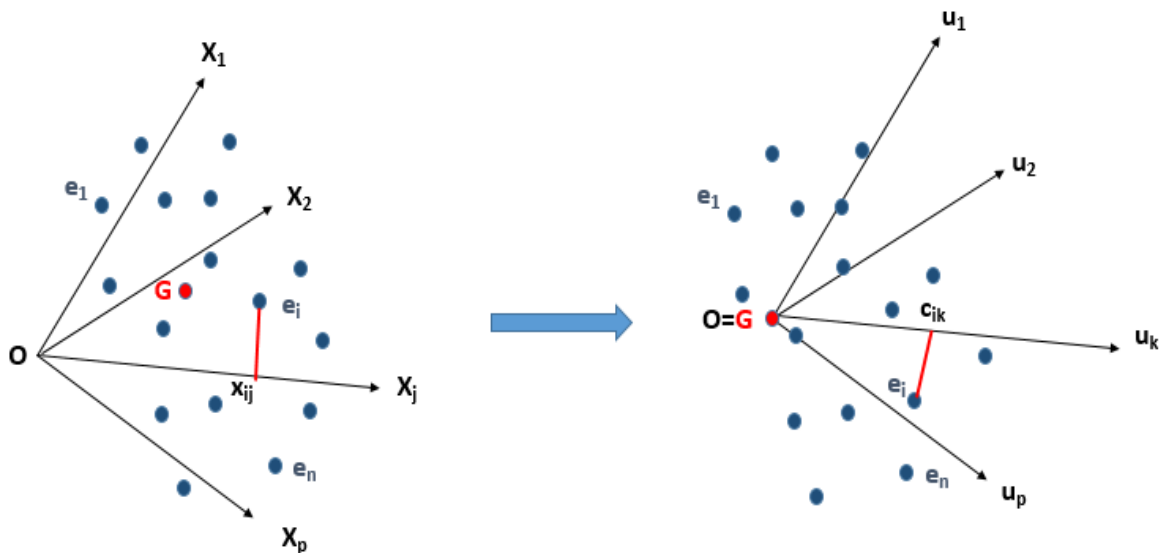


Figure 2. 9 : construction d'un espace factoriel (Duby et al, 2008)

Pour pouvoir trouver la meilleure image approchée du nuage, il faut que l'axe sur lequel on le projette permette une dispersion maximale et pour cela on doit déterminer les axes factoriels (axes principaux) par le principe d'ajustement ou par calcul numérique.

a.3.1. Détermination des axes principaux

Afin de déterminer les axes principaux, on doit tout d'abord effectuer l'ajustement du nuage des individus, ensuite on passe au calcul numérique des axes.

Ajustement du nuage des individus

Le principe d'ajustement est de perdre le moins d'information possible c'est-à-dire chercher un sous espace qui permet de voir au mieux le nuage des individus.

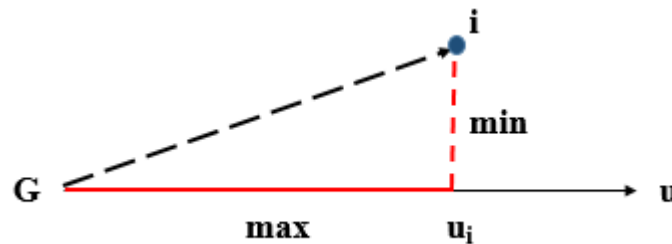


Figure 2. 10: ajustement d'un individu i (Husson,2009)

Pour trouver l'axe factoriel qui déforme le moins possible le nuage, il faut que la distance $\overline{Gu_i}$ soit grande (figure 2.11), $((Gu_i)^2 \text{ grand} \Rightarrow (iu_i)^2 \text{ petit avec } u_i \in \text{axe (Pythagore)})$ ce qui nous amène à maximiser la somme $\sum_i (Gu_i)^2$.

Pour maximiser $\sum_i (Gu_i)^2$ on doit trouver le meilleur plan qui contient le meilleur axe factoriel (avec $u_i \in$ ce plan) ensuite trouver un axe orthogonal au premier (u_1+u_2) et qui maximise l'inertie projetée $\sum_i (Gu_i)^2$, puis on cherche un 3eme orthogonal au deux premier d'inertie maximum.

Calcul numérique des axes principaux

On appelle axes principaux d'inertie les axes de direction des vecteurs propre (un vecteur est dit propre si l'application linéaire modifie sa taille sans changer sa direction).

Un vecteur propre x de composante $(x', x'', \dots)$ Associé à la valeur propre λ doit vérifier la relation :

$$(V - \lambda I_n) \begin{pmatrix} x' \\ x'' \\ . \\ . \\ . \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ . \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

Tel que :

V est la matrice des variance-covariance ;

Le premier axe est celui associé à la plus grande valeur propre λ_1 ;

Le deuxième axe est celui associé à la deuxième valeur propre λ_2 ;

Et ainsi de suite...

a.3.2. Sélection du nombre q axes factoriels à retenir

Les critères utilisés pour sélectionner le nombre d'axes factoriel sont généralement empirique. Il y'a la méthode du coude qui consiste à détecter un coude sur le diagramme des valeurs propre ; ou le critère de KAISER qui consiste à ne retenir que les valeurs propre

supérieure à la moyenne, et lorsqu'on est dans une ACP normé la somme des valeurs propre est égal au nombre p de ces valeurs et leurs moyenne est égal à 1. De ce critère on ne retiendra que les valeurs propres supérieures à 1.

a.3.3. Pourcentage d'inertie expliquée

Le pourcentage de variance expliqué par les axes factoriel retenus est obtenu par la somme de leurs valeurs propre divisé par la trace. Cette valeur permet d'évaluer en quelque sorte la quantité d'information initiale recueillie par chaque axe.

Le pourcentage d'inertie (variance ou dispersion du nuage) expliqué par un axe factoriel mesure la part d'inertie expliqué par l'axe ui .

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100 \quad (2.24)$$

a.3.4. Détermination des composantes principales

Les lignes et colonnes de la matrice de corrélation correspondent à de nouvelles variables appelés composantes principales. A chaque axe est associée une composante principale :

La composante c^1 est le vecteur renfermant les coordonnées de projection des individus sur l'axe 1

La composante c^2 est le vecteur renfermant les coordonnées de projection des individus sur l'axe 2

La composante c^n est le vecteur renfermant les coordonnées de projection des individus sur l'axe n

On prend chaque composante principale comme combinaison linéaire des variables initiales de la forme :

$$\text{Exemple : Pour } i=1 \quad c^1 = x_1^1 u_1^1 + x_2^1 u_1^2 + \dots x_p^1 u_1^n \quad (2.25)$$

Les composantes principales forment le vecteur C :

$$C = \begin{pmatrix} c^1 \\ c^2 \\ \vdots \\ c^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & \dots & x_p^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & \dots & x_p^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & \dots & x_p^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^1 & u_2^1 & \dots & \dots & u_p^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & \dots & \dots & u_p^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ u_1^n & u_2^n & \dots & \dots & u_p^n \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Tel que :

$$X_c = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & \dots & x_p^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & \dots & x_p^2 \\ & & \ddots & & \\ x_1^n & x_2^n & \dots & \dots & x_p^n \end{pmatrix} \quad \text{la matrice des données centrées}$$

Et

$$\Delta = \begin{pmatrix} u_1^1 & u_2^1 & \dots & \dots & u_p^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & \dots & \dots & u_p^2 \\ & & \ddots & & \\ u_1^n & u_2^n & \dots & \dots & u_p^n \end{pmatrix} \quad \text{la matrice des axes principaux}$$

On a :

$$c^1 = \begin{pmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \\ c_{1p} \end{pmatrix} \text{ et } c^2 = \begin{pmatrix} c_{21} \\ c_{22} \\ \vdots \\ c_{2p} \end{pmatrix} \text{ et } \dots \dots c^n = \begin{pmatrix} c_{n1} \\ c_{n2} \\ \vdots \\ c_{np} \end{pmatrix}$$

Donc les variables des composantes principales forment une matrice $\mathbf{C} = \mathbf{X}_c \Delta$ (2.27)

La variance d'une composante principale est égale à l'inertie apportée par l'axe principale qui lui est associé :

1 ^{ère} composante C^1	variance : λ_1
2 ^{ème} composante C^2	variance : λ_2
3 ^{ème} composante C^3	variance : λ_3

Ces p composantes principales C^i s'expriment comme combinaisons linéaire des anciennes variables.

Remarque : les composantes principales sont non corrélées deux à deux.

2.6.2. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des variables

Même étapes à suivre que pour les individus, cela consiste à rechercher des axes orthogonaux qui permettent de représenter au mieux les variables, et à la fin on obtiendra des espaces factoriels identiques à ceux obtenus par l'ajustement de l'ensemble des individus.

2.7. Analyse en composantes principales normée et ses particularités

Pour éviter les reproches fait par les praticiens à l'ACP simple, on cherche à normaliser les variables (travailler sur des variables sans dimension) et pour cela il y'a plusieurs façon, mais la plus utilisé est celle qui consiste à divisé les valeurs des variables centrées par leurs écart type, c'est-à-dire travailler sur des variables centrées et réduites.

Les particularités de l'ACP normée par rapport à l'ACP simple proviennent du fait que la matrice de corrélation R n'a que des 1 sur sa diagonale principale. La trace de la matrice est égale à l'inertie totale du nuage calculée avec la distance euclidienne que l'on a choisie, et est toujours égale à p .

Cette particularité donne une règle supplémentaire pour choisir le nombre d'axes que l'on va garder pour les interprétations fondées sur le raisonnement suivant :

On a p valeurs propres dont la somme vaut p . on peut ne considérer comme significatives que les valeurs propres dont la valeur est supérieure à 1. C'est bien sur une règle empirique mais qui peut servir de guide pour le choix de la dimension du sous-espace que l'on veut garder.

Une autre particularité de l'ACP normée, est que la représentation des variables avec les cercles de corrélation correspond exactement à la représentation des variables dans R^n que l'on aurait construite si l'on avait adopté la même démarche que celle qui a servi pour la représentation des individus dans R^p .

2.8. Interprétation des résultats de l'ACP

La qualité de représentation du nuage dans le sous espace factoriel est exprimé par le pourcentage d'inertie, cette mesure doit être complété par d'autre considérations comme la représentation des individus et des variables. Bien que représentant une part importante de l'inertie globale du nuage, les axes retenus ne suffisent pas à expliquer correctement certain individus ou variable (deux individus peuvent être proche en projection en étant très éloigner en réalité si leurs représentation ne sont pas de bonne qualité).

La qualité de représentation d'une variable j sur le $q^{\text{ème}}$ axe factoriel est exprimée par le coefficient de corrélation linéaire entre la variable initiale et la nouvelle variable (composante principale).

La valeur de cette corrélation sera également très importante pour interpréter les nouveaux axes factoriels en fonction des variables initiales. Donc l'ACP peut contenir deux études :

- L'étude des individus ;
- L'étude des variables.

2.8.1. Etude des individus

L'étude des individus revient à démontrer la relation existante entre individus du fait de leurs proximités. Définir la ressemblance des individus permet d'identifier des sous-ensembles et de construire des groupes, de sorte que les individus appartenant à un même groupe soient proche du point de vu des variables et éloignés des individus d'un autre groupe.

✓ Représentation des individus dans les nouveaux axes

Pour représenter les individus dans les nouveaux axes il suffit de calculé leurs coordonnées, et projeter orthogonalement le vecteur G_{ei} sur l'axe D_k pour obtenir Y_{ik} coordonnée de l'individu e_i (figure 2.12).

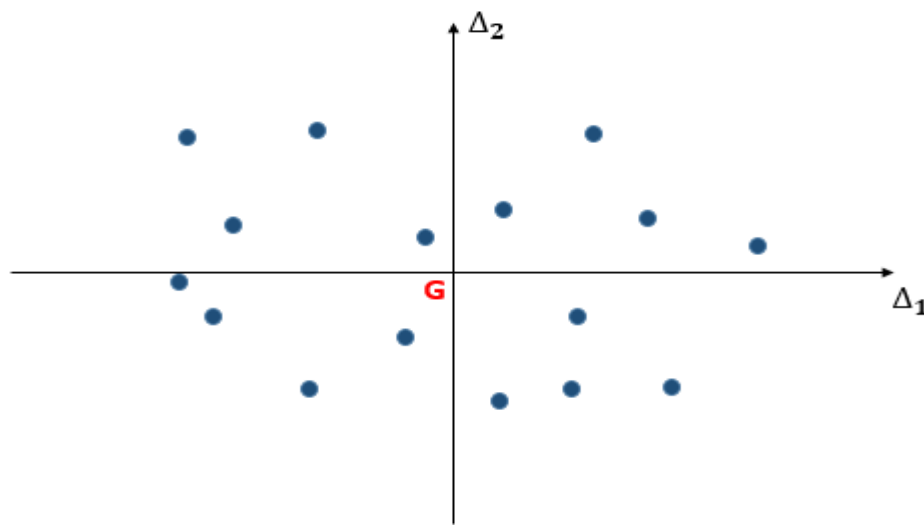


Figure 2. 11: Représentation des individus dans les nouveaux axes (Duby et al, 2008)

Remarque : si deux individus e_i et $e_{i'}$ ont des coordonnées de signe opposé sur un axe Δ cela signifie qu'ils s'opposent sur cet axe.

✓ Qualité de représentation des individus

Les individus contribuant à la formation d'un axe sont ceux dont les coordonnées sont les plus élevé en valeur absolue. Les individus dont les projections sont éloignées sur un axe sont forcément éloigner dans l'espace, en revanche ceux dont les projections sont proches peuvent ne pas l'être.

La qualité de représentation d'un individu i sur un axe factoriel est mesurée par le cosinus carré de l'angle entre l'axe factoriel et le vecteur G_{ei} . Plus le cosinus est grand, plus le vecteur G_{ei} sera proche de l'axe et bien représenté.

$$\cos(\alpha)^2 = \frac{\langle \overrightarrow{Ge_i}, \overrightarrow{Gu_k} \rangle^2}{\|G\alpha_i\|^2} \quad (2.28)$$

Le cosinus carré est appelé contribution relative du plan à l'individu, plus un individu est proche du plan, plus l'angle est faible et plus le cosinus carré est proche de 1. Les contributions absolues expriment l'importance de chaque individu dans la création des axes par rapport aux autres individus.

Un individu dont la projection sur un axe est proche du centre de gravité contribuera faiblement à l'inertie portée par cet axe, tandis qu'un individu dont la projection est éloignée du centre de gravité contribuera d'autant plus à sa confection. On se sert de ces contributions pour interpréter les nouveaux axes de l'ACP en fonction des individus.

✓ **Interprétation des axes factoriels par les points des individus**

Les proximités et les oppositions entre individus aident à la compréhension des nouveaux axes. En effet les individus qui sont proches ont le même profil, et ceux qui sont placés au centre du graphique peuvent être analysés comme moyens, alors que ceux qui diffèrent seront considérés comme individus supplémentaires.

On peut interpréter le graphique d'individus grâce aux variables en calculant la corrélation entre variable et axe factoriel : si la corrélation est proche de 1 cela voudra dire que les valeurs de la variable sont très liées aux coordonnées de l'axe et si la corrélation est négative cela voudra dire que les individus qui prennent de faibles valeurs pour la variable prennent de fortes valeurs sur l'axe factoriel.

2.8.2. Etude des variables

Etudier les variables revient à démontrer les relations existantes entre elles du fait de leurs corrélations et à rechercher leurs ressemblances.

✓ **Représentation des variables dans les nouveaux axes**

Les individus sont représentés dans l'espace des anciennes variables en faisant un changement de base. Les nouveaux axes sont des combinaisons linéaires des anciens, et peuvent être considérés comme de nouvelles variables (composantes principales) combinaisons linéaires des anciennes.

Pour voir comment les anciennes variables sont liées aux nouvelles, on calcule les corrélations entre elles.

✓ **Corrélation entre les composantes principales et les variables d'origine**

Les corrélations entre les axes factoriels et les variables initiales indiquent la qualité de représentation de la variable sur l'axe (Plus cette corrélation est forte plus la variable est proche de cet axe). Les variables bien représentées dans le plan sont les plus proches de la circonférence appelée cercle de corrélation.

Les angles formés entre les variables et avec les axes nous permettent de mieux interpréter cette corrélation, en effet si l'angle formé entre les variables est nul on peut dire qu'elles sont corrélées entre elles par contre si il est droit cela signifie qu'elles ne le sont pas, et celles qui présentent un angle plat sont corrélées négativement. Plus une variable est corrélée avec un axe plus elle est proche de celui-ci.

La corrélation entre une composante principale c_j et une variable x_i est égal à :

$$r_{ij} = \frac{\text{covariance } c_j x_i}{\sqrt{\text{variance } c_j} \sqrt{\text{variance } x_i}} \quad (2.29)$$

Or $c = u_j' x$ (2.33)

Une corrélation peut être positive, négative ou nulle avec différentes intensités qui varient dans l'intervalle $[-1 ; +1]$

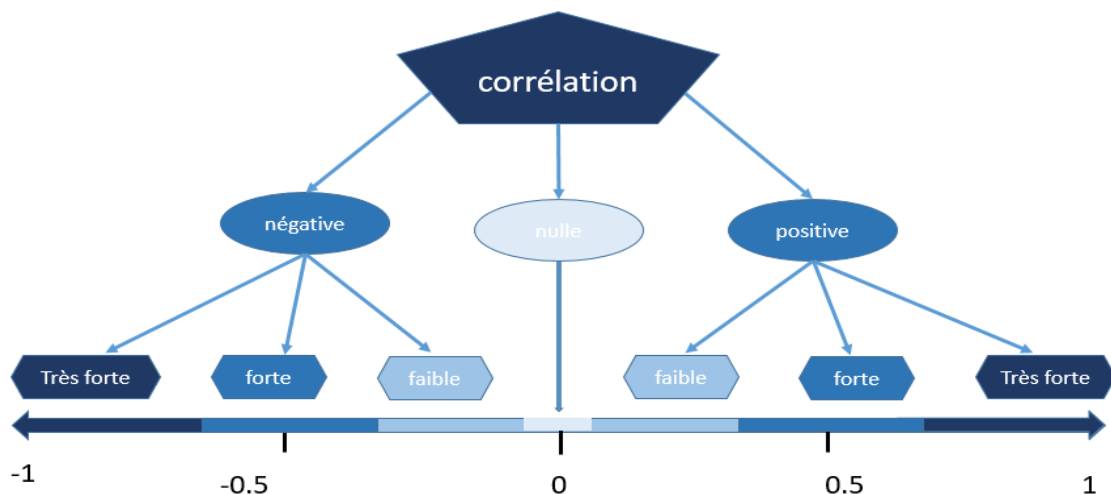


Figure 2. 12: intensité de la corrélation sur l'intervalle à valeurs réelles $[-1, +1]$

La représentation des anciennes variables se fera en prenant comme coordonnées leurs coefficients de corrélation avec les nouvelles variables. La dénomination cercle de corrélation vient du fait que le coefficient de corrélation varie de -1 à $+1$. Les représentations des variables de départ sont des points qui se trouvent à l'intérieur du cercle de corrélation qui sera complété une fois son centre soit relié aux différents points variables de façon à obtenir leurs directions. L'interprétation des variables se fait à partir de leurs directions (figure 2.13).

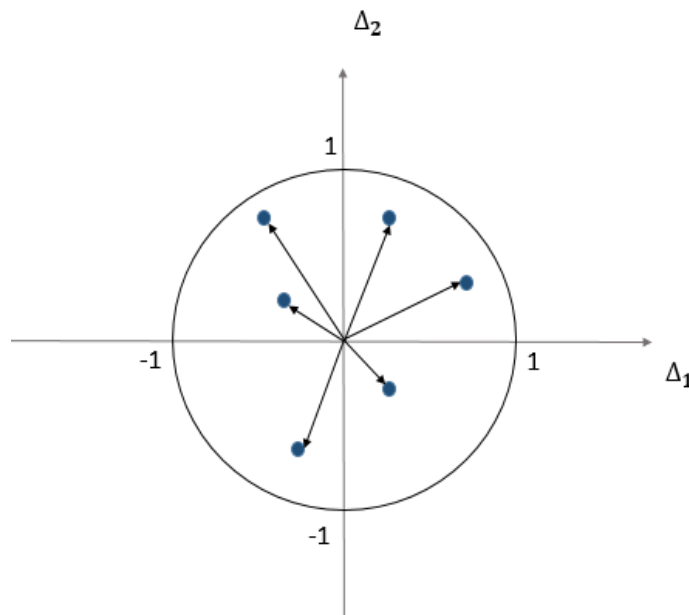


Figure 2. 13 : cercle de corrélation (Duby et al, 2008).

✓ Etude des liaisons entre les variables

L'interprétation des positions des anciennes variables les unes par rapport aux autres peut se faire sur le graphique du cercle de corrélation. Deux points très proche du cercle seront corrélé entre eux positivement, alors que deux qui sont proche mais dans des positions symétriques par rapport à l'origine seront corrélé négativement (une augmente l'autre diminue), tandis que deux variables proches du cercle, dont les vecteurs qui les joignent à l'origine forment un angle droit, ne sont pas du tout corrélés.

Remarque : Il peut arriver que deux variables très fortement liées aient un coefficient de corrélation nul ou très faible si leurs liaison n'est pas linéaire.

2.9. Lien entre les deux études

Les deux études sont liées entre elles de façon que lors de la construction des groupe d'individus, on aura besoin d'utiliser les variables afin de les caractériser, de même pour l'étude des liaisons entre les différentes variables, avoir des individus spécifiques peut apporter un plus à la déduction de ces liaisons.

2.10. Individus et variables supplémentaires

Il arrive que l'on veuille faire apparaître dans les représentations graphiques certains individus sans qu'ils interviennent dans la détermination des axes. Cela peut être le cas de nouveaux individus que l'on veut simplement positionner par rapport aux autres sans que les

positions de ceux-ci soient influencées par les nouveaux. On dit d'eux qu'ils sont des individus supplémentaires.

Il en est de même pour les variables. On peut vouloir représenter une variable qui dépend de façon synthétique des p variables choisies pour faire l'ACP, afin de mieux comprendre comment cette variable est liée aux anciennes. Ces variables sont appelées variables supplémentaires.

Pour représenter un individu supplémentaire, il suffit de multiplier l'axe principal par les coordonnées centré réduite de cet individu, et pour une variable, il suffit de calculer ces coefficients de corrélation empirique avec les composantes principales.

Conclusion

Après avoir exposé le principe de la méthode « ACP », nous procédons, dans le chapitre suivant, à son application au parc de retenues de la wilaya de Tizi Ouzou. Pour traiter le tableau de données composé de retenues (individu) en ligne et paramètres (variables) en colonne, nous faisons appel au logiciel R[®]. Ce logiciel, dont le principe est présenté en annexe permet de ressortir les corrélations entre les paramètres et les ressemblances entre les individus.

***Chapitre3 : Application de
l'ACP au parc des retenues collinaires
de la wilaya de Tizi Ouzou, sous R***

Introduction

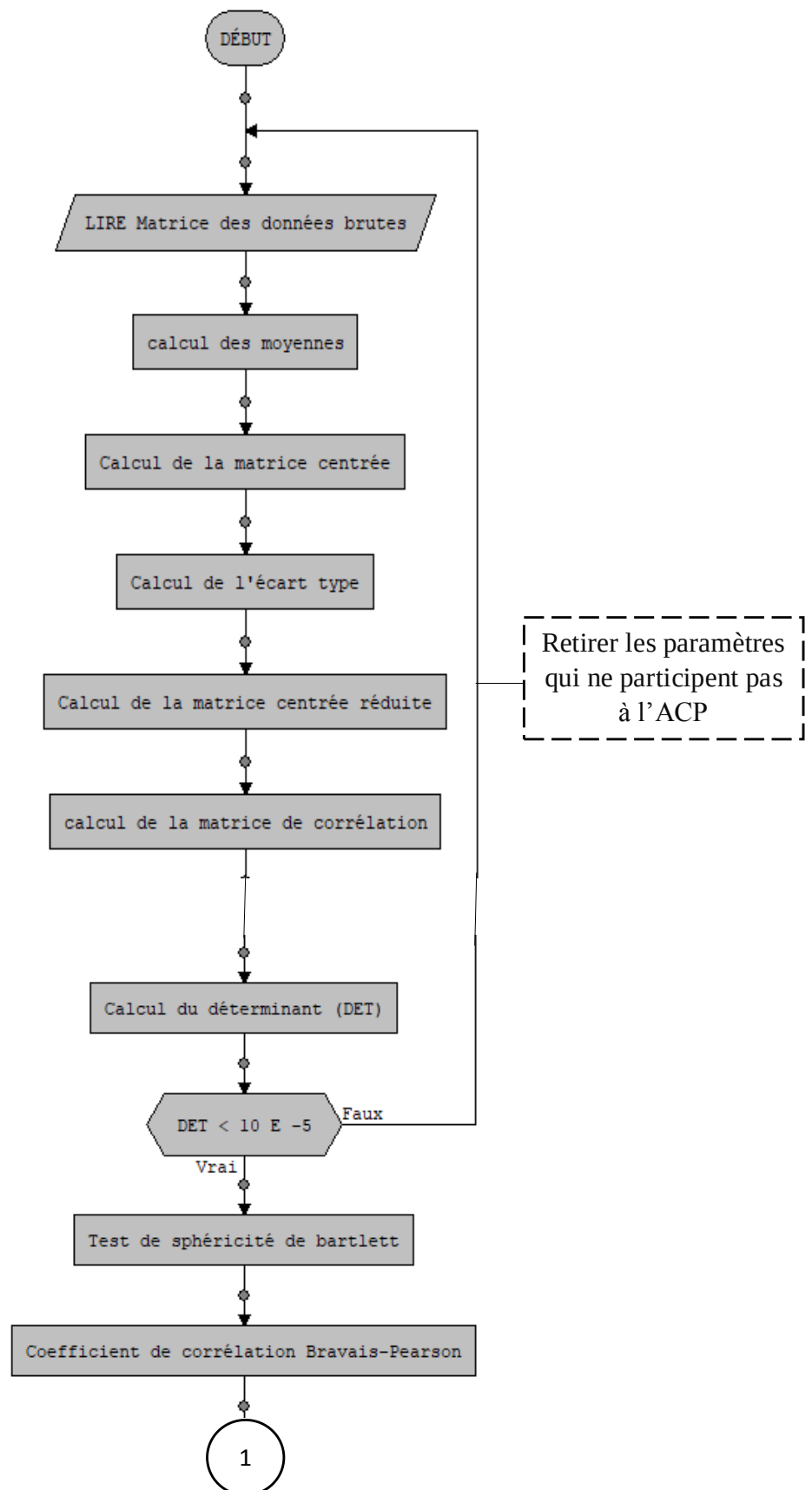
Le chapitre 3 est consacré à l'application de la méthode « ACP » et à l'analyse des paramètres (environnementaux, structuraux et fonctionnels) pris en compte dans la méthode d'expertise pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des retenues collinaires, tel que présentée dans le premier chapitre. L'objectif est de ressortir les paramètres corrélés afin de rendre l'information moins redondante. Cette méthode consiste à traiter le tableau de données rectangulaire à n lignes qui représente dans notre cas les retenues expertisées et P colonnes qui sont les paramètres d'analyse. Etant donné la dimension de la matrice (40×18), compte tenu de l'indice de vulnérabilité, nous avons fait appel au logiciel R® pour le traitement des données et la conception des graphiques et organigrammes.

3.1. Présentation des données

Les données sont sous forme d'un tableau à n lignes et p colonnes, que l'on stocke sous la forme d'une matrice X ($n \times p$). Cette matrice contient 40 lignes et 18 colonnes. Les lignes sont les retenues collinaires appelées « individus », et les colonnes sont les paramètres appelées variables. Ces données sont représentées dans le tableau 3.1.

Il y'a lieu de noter que les paramètres présentant des valeurs identiques pour les différents individus ne peuvent participer à une « ACP » et doivent être retirés de la matrice ; ce qui n'est pas notre cas.

L'organigramme suivant résume les étapes principales pour la réalisation d'une ACP.



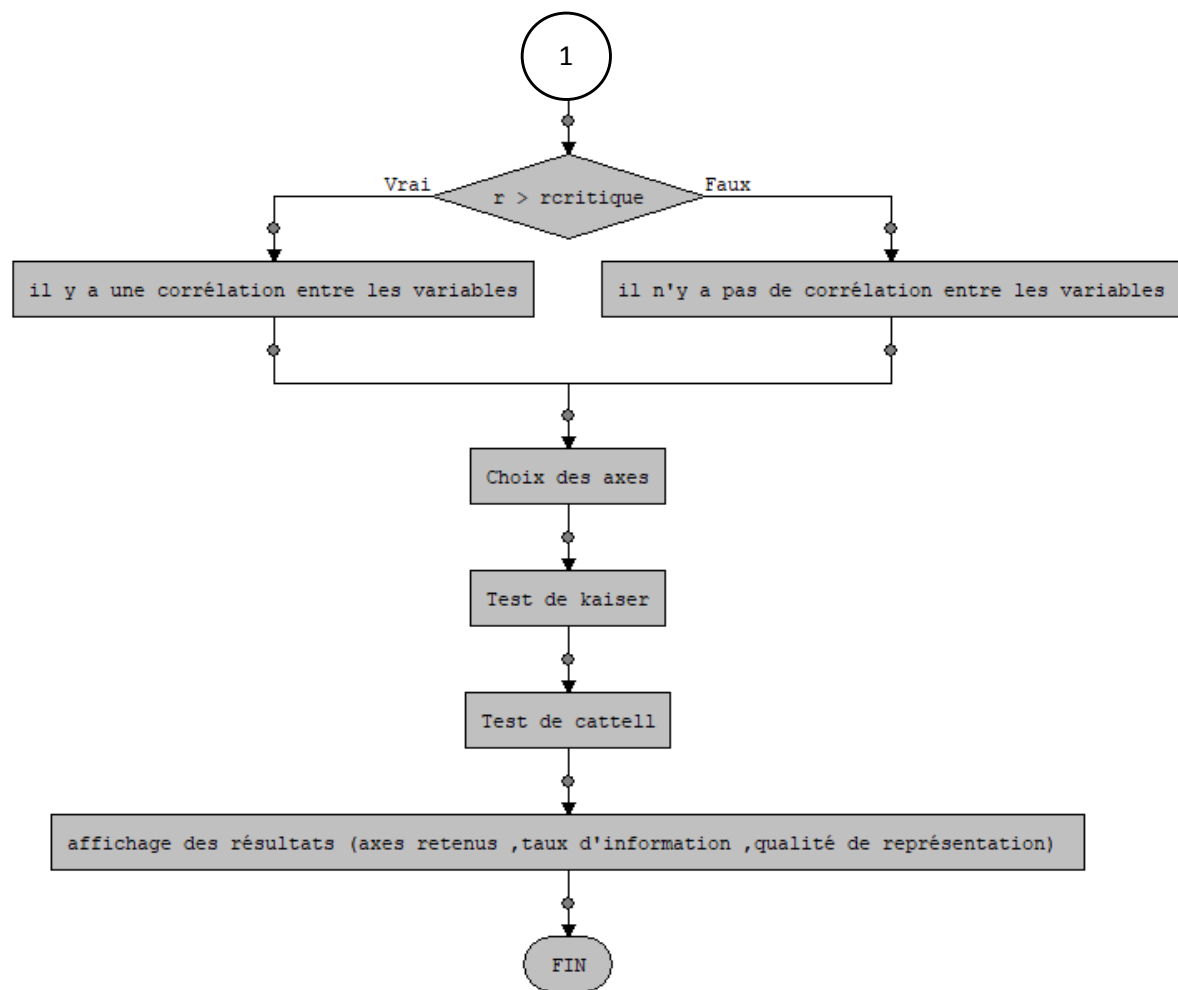


Figure 3.1 : Organigramme de l'ACP.

Tableau 3.1 : Données brutes (n x p)

	code	Iv	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
A.GUEHRENE N°270	1	88	4	4	16	4	5	2	2	8	3	2	1	1	1	16	3	12	4
AIT TOUDERT N°169	2	122	4	4	24	4	5	1	2	16	9	8	5	3	3	16	2	12	4
AIT TOUDERT N°170	3	96	4	4	16	4	4	1	2	8	4	8	1	3	1	16	4	12	4
AIT TOUDERT N°171	4	145,5	4	4	16	4	5,5	1	2	16	32	8	6	7	9	16	2	9	4
AIT TOUDERT N°172	5	104,5	4	4	16	4	5,5	1	2	8	3	14	1	3	4	16	2	9	8
AZEFFOUN N° 10	6	118	12	4	16	4	3	3	2	16	8	8	3	4	4	16	2	9	4
AZEFFOUN N° 11	7	119,5	12	4	16	4	4,5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	12
AZEFFOUN N° 12	8	116	12	4	16	4	5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	8
AZEFFOUN N° 14	9	105,5	12	4	16	4	4,5	3	3	8	8	4	3	4	4	16	2	6	4
AZEFFOUN N° 15	10	130,5	12	4	16	4	3,5	3	6	8	16	8	3	3	4	16	2	6	16
BOUZEGUENE N°2	11	92,5	4	2	12	4	6,5	3	2	4	6	8	3	3	3	16	2	6	8
BOUZEGUENE N°3	12	96,5	4	2	12	4	6,5	2	2	2	12	8	4	2	4	16	2	6	8
DRAA BEN KHEDDA N°415	13	110	4	4	16	4	6	1	2	16	12	2	4	7	4	4	4	12	8
DRAA EL MIZAN N°260	14	107,5	4	4	16	4	4,5	1	2	8	4	2	1	1	1	16	3	12	24
FREHA N°389	15	124	6	8	12	4	6	1	2	16	16	8	4	4	4	16	2	3	12
FREHA N°395	16	89	6	4	12	4	5	3	2	8	3	4	3	1	2	16	3	4	9
FREHA N°396	17	156	6	4	12	4	5	4	4	16	16	8	16	16	16	16	2	3	8
FREHA N°397	18	104	6	8	12	4	6	1	2	8	3	4	1	4	6	16	3	8	12

FREHA N°398	19	149	6	8	12	4	6	3	4	16	16	4	12	12	12	16	3	9	6
ILOULA OUMALOU N° 399	20	95,5	4	2	12	4	6,5	2	2	3	9	8	4	3	4	16	2	6	8
ILOULA OUMALOU N° 1	21	100	4	4	4	4	6	2	3	12	16	4	2	3	4	16	2	6	8
MEKLA N° 367	22	96,5	6	2	6	4	4,5	3	2	2	8	8	4	4	4	16	2	9	12
MEKLA N°368	23	95,5	6	2	12	4	4,5	4	2	4	8	2	2	3	3	16	2	9	12
MEKLA N° 391	24	159,5	6	2	12	4	4,5	4	12	16	16	4	16	12	12	16	2	9	12
MEKLA N°393	25	85	6	4	12	2	4	1	2	8	3	4	1	1	1	16	2	6	12
MEKLA (chaoufa) N°394	26	121	6	4	12	2	5	3	2	8	6	6	9	16	12	12	2	8	8
OUAGUENOUN 360	27	137	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	6	3
SIDI NAAMANE N°421	28	112	4	2	12	4	5	1	2	8	3	16	2	2	1	16	2	20	12
SIDI NAAMANE N°428	29	104	4	2	2	4	5	1	2	8	4	1	4	9	4	16	2	8	28
SOUAMAA N°2	30	99,5	6	4	4	4	4,5	2	2	16	8	6	2	3	2	16	2	6	12
TIMIZART N°201	31	129,5	6	4	6	4	4,5	2	4	4	16	4	12	12	16	16	2	9	8
TIMIZART N°363	32	79	6	4	12	4	5	1	2	8	3	4	1	4	2	4	2	8	9
TIMIZART N°366	33	88,5	6	4	6	4	4,5	1	2	8	6	2	1	1	1	16	2	12	12
TIMIZART N°388	34	84,5	6	4	6	4	4,5	1	8	8	12	4	1	1	3	4	2	4	12
TIMIZART N°360	35	137	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	3	6
TIMIZART N°200	36	84,5	6	4	6	4	4,5	2	4	4	6	6	3	2	4	16	2	3	8
TIRMITINE N°401	37	113,5	4	4	12	4	5,5	1	2	4	12	18	4	2	4	16	1	8	12
TIRMITINE N°402	38	95	4	2	6	4	4	1	2	16	3	4	4	2	4	16	3	8	12
TIRMITINE N°412	39	84,5	4	2	12	4	4,5	1	2	4	8	2	1	1	2	16	1	8	12
TIZI N°TLATA N°300	40	132	4	4	16	4	5	1	2	8	32	2	1	1	1	16	3	12	20

3.2. Conditions d'application de l'ACP

Dans la théorie, et la pratique, l'ACP se met en œuvre sur la matrice de variance-covariance ou sur la matrice des corrélations. Le logiciel R® s'intéresse à la matrice des corrélations. En effet, réaliser une ACP sur la matrice de variance-covariance n'élimine pas les dimensions individuelles de chacune des variables étudiées. Ce problème est automatiquement réglé avec la matrice des corrélations.

Il existe des cas où l'ACP est totalement injustifier. Il ne suffit pas d'avoir un tableau croisant des variables quantitatives et des individus pour se jeter dans une ACP, encore faut-il que ce tableau vérifie la factorisation des variables.

On parle de la factorisation des variables lorsqu'il existe un lien entre elles. Ce lien, traduit par la présence de corrélations entre les variables qui permet d'extraire les composantes principales. L'ACP est une compression de l'information ainsi, la question qui se pose : est-il possible d'obtenir un bon résumé de l'information ? Ceci n'est possible que si les données présentent une certaine redondance.

Une première stratégie consiste simplement à inspecter la matrice de corrélation. Les éléments hors diagonale prennent des valeurs faibles (en valeurs absolue) lorsque les variables sont peu liées entre elles. Il est dès lors illusoire d'espérer obtenir un résumé efficace en un nombre de facteurs réduit.

Certaines variables sont fortement corrélées et d'autres moins. Il est difficile de donner une valeur seuil à partir de laquelle il faut décider que les liaisons exploitable existent. Il s'agit avant tout d'avoir une impression générale de corrélation, en consultant la matrice.

Avant d'appliquer la méthode ACP il ya lieu de vérifier deux tests :

- Test de sphéricité de Bartlett
- Singularité de la matrice de corrélation

3.2.1. Test de sphéricité de Bartlett

Le test de sphéricité de Bartlett propose une mesure globale en s'appuyant sur une démarche statistique. Il vise à détecter dans quelle mesure la matrice de corrélation calculée sur nos données (matrice observée) diverge significativement de la matrice unité. Il vérifie l'hypothèse nulle selon laquelle toutes les corrélations seraient égales à zéro. Si l'indice **de significativité α (le risque d'erreur)** tend vers **0.00**, il est très significatif. Lorsqu'il est inférieur à **0.05**, il est significatif, entre **0.05** et **0.10**, il est acceptable et au-dessus de **0.10** on rejette l'application de l'ACP (**Ruben, 2011**). En pratique, lorsqu'on réalise un test statistique avec le logiciel R®, on ne se soucie pas directement de la valeur seuil. En revanche, on

s'intéresse de près à la **p-value** fournie par le logiciel. Cette **p-value** est ensuite comparée au risque alpha que l'on s'est fixé avant le test (*il est quasiment toujours égal à 5%*)

- Si **p-value** < 5% que l'on s'est fixé, on conclura le rejet de l'hypothèse nulle
- Si **p-value** > 5% que l'on s'est fixé, on conclura l'acceptation de l'hypothèse nulle.

3.2.2. Non singularité de la matrice des corrélations.

On parle de la singularité de la matrice des corrélations, si l'une des variables est parfaitement corrélée avec une autre variable ou avec une combinaison linéaire. Pour tester la corrélation parfaite, il faut calculer le déterminant de la matrice : Par définition une matrice singulière est de déterminant nul (0), donc elle n'est pas inversible, dans ce cas, une ACP serait injustifiée, mieux (*Field, 2000*) suggère qu'on ne devrait jamais procéder à une ACP si le déterminant de la matrice des corrélations est **inférieur à 10^{-5}** . Dans le cas où le déterminant serait égal à 1, la matrice s'apparente alors à la matrice identité (*tous les termes sauf éventuellement ceux de sa diagonale, sont nuls*), ce qui traduit une absence totale de corrélation entre les variables, donc une ACP serait totalement absurde (il faut s'assurer que la matrice de corrélation soit de déterminant non nul, et différent de l'unité). Le test de sphéricité de Bartlett nous permet de vérifier **l'hypothèse nulle**.

Pour vérifier la factorisation des données et les deux tests (*test de sphéricité de Bartlett et la singularité de la matrice des corrélations*), dans un premier temps, il convient d'observer la matrice des corrélations obtenu par $R^{\otimes}$ (tableau 3.3) (Si plusieurs variables sont corrélées, la factorisation est possible si non, la factorisation n'a pas de sens et n'est donc pas conseillée), ensuite on passe au calcul du déterminant pour vérifier la singularité de la matrice.

3.3. Calcul de la matrice de corrélation

3.3.1. Présentation des données

Pour calculer la matrice de corrélation, nous présentons les données sous forme du tableau 3.2

Tableau 3.2: Tableau traité par R®

Iv	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
88	4	4	16	4	5	2	2	8	3	2	1	1	1	16	3	12	4
122	4	4	24	4	5	1	2	16	9	8	5	3	3	16	2	12	4
96	4	4	16	4	4	1	2	8	4	8	1	3	1	16	4	12	4
145,5	4	4	16	4	5,5	1	2	16	32	8	6	7	9	16	2	9	4
104,5	4	4	16	4	5,5	1	2	8	3	14	1	3	4	16	2	9	8
118	12	4	16	4	3	3	2	16	8	8	3	4	4	16	2	9	4
119,5	12	4	16	4	4,5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	12
116	12	4	16	4	5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	8
105,5	12	4	16	4	4,5	3	3	8	8	4	3	4	4	16	2	6	4
130,5	12	4	16	4	3,5	3	6	8	16	8	3	3	4	16	2	6	16
92,5	4	2	12	4	6,5	3	2	4	6	8	3	3	3	16	2	6	8
96,5	4	2	12	4	6,5	2	2	2	12	8	4	2	4	16	2	6	8
110	4	4	16	4	6	1	2	16	12	2	4	7	4	4	4	12	8
107,5	4	4	16	4	4,5	1	2	8	4	2	1	1	1	16	3	12	24
124	6	8	12	4	6	1	2	16	16	8	4	4	4	16	2	3	12
89	6	4	12	4	5	3	2	8	3	4	3	1	2	16	3	4	9
156	6	4	12	4	5	4	4	16	16	8	16	16	16	16	2	3	8
104	6	8	12	4	6	1	2	8	3	4	1	4	6	16	3	8	12
149	6	8	12	4	6	3	4	16	16	4	12	12	12	16	3	9	6
95,5	4	2	12	4	6,5	2	2	3	9	8	4	3	4	16	2	6	8
100	4	4	4	4	6	2	3	12	16	4	2	3	4	16	2	6	8
96,5	6	2	6	4	4,5	3	2	2	8	8	4	4	4	16	2	9	12
95,5	6	2	12	4	4,5	4	2	4	8	2	2	3	3	16	2	9	12
159,5	6	2	12	4	4,5	4	12	16	16	4	16	12	12	16	2	9	12
85	6	4	12	2	4	1	2	8	3	4	1	1	1	16	2	6	12
121	6	4	12	2	5	3	2	8	6	6	9	16	12	12	2	8	8
137	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	6	3
112	4	2	12	4	5	1	2	8	3	16	2	2	1	16	2	20	12
104	4	2	2	4	5	1	2	8	4	1	4	9	4	16	2	8	28
99,5	6	4	4	4	4,5	2	2	16	8	6	2	3	2	16	2	6	12
129,5	6	4	6	4	4,5	2	4	4	16	4	12	12	16	16	2	9	8
79	6	4	12	4	5	1	2	8	3	4	1	4	2	4	2	8	9
88,5	6	4	6	4	4,5	1	2	8	6	2	1	1	1	16	2	12	12
84,5	6	4	6	4	4,5	1	8	8	12	4	1	1	3	4	2	4	12
137	6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	3	6
84,5	6	4	6	4	4,5	2	4	4	6	6	3	2	4	16	2	3	8
113,5	4	4	12	4	5,5	1	2	4	12	18	4	2	4	16	1	8	12
95	4	2	6	4	4	1	2	16	3	4	4	2	4	16	3	8	12
84,5	4	2	12	4	4,5	1	2	4	8	2	1	1	2	16	1	8	12
132	4	4	16	4	5	1	2	8	32	2	1	1	1	16	3	12	20

3.3.2. Calcul des moyennes et écarts types des variables

La moyenne et l'écart type des variables sont déterminés conformément aux relations (2.3) et (2.4) respectivement (voir chapitre 2). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.3.

Tableau 3.3: Moyenne et écart-type des variables.

	Abréviation utilisées	Moyenne	Ecart-Type	coefficient de variation
Iv	I.R	110,19	21,2	0,19
Implantation de la retenue	Z.S	5,9	2,52	0,43
Zone sismique	T.S	3,8	1,49	0,39
Type de Sol	A.N	11,95	4,47	0,37
Action de Neige	A.V	3,9	0,44	0,11
Action du Vent	E.C.D	4,96	0,8	0,16
Etanchéité du corps de la retenue	T.P.T.A	2	1,04	0,52
Type de protection du talus amont de la retenue	T.P.T.AV	2,85	1,96	0,69
Type de protection du talus aval de la retenue	T.R.C	8,88	4,67	0,53
Type de revêtements de la crête de la Retenue	T.D	9,75	6,87	0,70
Type de déversoir	T.C	6,13	3,75	0,61
Type de coursier	T.M.B	4,58	4,65	1,02
Type de murs bajoyers	T.B.D	5	4,73	0,95
Type de bassin de dissipation d'énergie	T.C.V	5,15	4,61	0,90
Type de conduite de vidange	D.R	15	3,23	0,22
Destination de la retenue	F.E	2,23	0,62	0,28
Etat d'envasement de la cuve	E.E.R	8,1	2,41	0,30
Fréquence d'entretien		10,03	5,2	0,52

3.3.3. Centrage du tableau de données (matrice centrée)

Centrer les données ne modifie pas la forme du nuage de points des données dans l'espace, cela revient juste à translater le nuage vers une autre origine qui est le centre de gravité du nuage.

La matrice centrée est déterminée en retranchant la moyenne de chaque variable conformément à la relation (2.9). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.4. Les nouvelles valeurs représentent les nouvelles coordonnées des points variables par rapport au barycentre.

Tableau 3.4 : Matrice des données centrées.

Iv	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
-22,19	-1,9	0,2	4,05	0,1	0,04	0	-0,85	-0,88	-6,75	-4,13	-3,58	-4	-4,15	1	0,77	3,9	-6,03
11,81	-1,9	0,2	12,05	0,1	0,04	-1	-0,85	7,12	-0,75	1,87	0,42	-2	-2,15	1	-0,23	3,9	-6,03
-14,19	-1,9	0,2	4,05	0,1	-0,96	-1	-0,85	-0,88	-5,75	1,87	-3,58	-2	-4,15	1	1,77	3,9	-6,03
35,31	-1,9	0,2	4,05	0,1	0,54	-1	-0,85	7,12	22,25	1,87	1,42	2	3,85	1	-0,23	0,9	-6,03
-5,69	-1,9	0,2	4,05	0,1	0,54	-1	-0,85	-0,88	-6,75	7,87	-3,58	-2	-1,15	1	-0,23	0,9	-2,03
7,81	6,1	0,2	4,05	0,1	-1,96	1	-0,85	7,12	-1,75	1,87	-1,58	-1	-1,15	1	-0,23	0,9	-6,03
9,31	6,1	0,2	4,05	0,1	-0,46	1	-0,85	-0,88	-1,75	1,87	-1,58	-1	-1,15	1	-0,23	0,9	1,97
5,81	6,1	0,2	4,05	0,1	0,04	1	-0,85	-0,88	-1,75	1,87	-1,58	-1	-1,15	1	-0,23	0,9	-2,03
-4,69	6,1	0,2	4,05	0,1	-0,46	1	0,15	-0,88	-1,75	-2,13	-1,58	-1	-1,15	1	-0,23	-2,1	-6,03
20,31	6,1	0,2	4,05	0,1	-1,46	1	3,15	-0,88	6,25	1,87	-1,58	-2	-1,15	1	-0,23	-2,1	5,97
-17,69	-1,9	-1,8	0,05	0,1	1,54	1	-0,85	-4,88	-3,75	1,87	-1,58	-2	-2,15	1	-0,23	-2,1	-2,03
-13,69	-1,9	-1,8	0,05	0,1	1,54	0	-0,85	-6,88	2,25	1,87	-0,58	-3	-1,15	1	-0,23	-2,1	-2,03
-0,19	-1,9	0,2	4,05	0,1	1,04	-1	-0,85	7,12	2,25	-4,13	-0,58	2	-1,15	-11	1,77	3,9	-2,03
-2,69	-1,9	0,2	4,05	0,1	-0,46	-1	-0,85	-0,88	-5,75	-4,13	-3,58	-4	-4,15	1	0,77	3,9	13,97
13,81	0,1	4,2	0,05	0,1	1,04	-1	-0,85	7,12	6,25	1,87	-0,58	-1	-1,15	1	-0,23	-5,1	1,97
-21,19	0,1	0,2	0,05	0,1	0,04	1	-0,85	-0,88	-6,75	-2,13	-1,58	-4	-3,15	1	0,77	-4,1	-1,03
45,81	0,1	0,2	0,05	0,1	0,04	2	1,15	7,12	6,25	1,87	11,42	11	10,85	1	-0,23	-5,1	-2,03
-6,19	0,1	4,2	0,05	0,1	1,04	-1	-0,85	-0,88	-6,75	-2,13	-3,58	-1	0,85	1	0,77	-0,1	1,97
38,81	0,1	4,2	0,05	0,1	1,04	1	1,15	7,12	6,25	-2,13	7,42	7	6,85	1	0,77	0,9	-4,03
-14,69	-1,9	-1,8	0,05	0,1	1,54	0	-0,85	-5,88	-0,75	1,87	-0,58	-2	-1,15	1	-0,23	-2,1	-2,03
-10,19	-1,9	0,2	-7,95	0,1	1,04	0	0,15	3,12	6,25	-2,13	-2,58	-2	-1,15	1	-0,23	-2,1	-2,03
-13,69	0,1	-1,8	-5,95	0,1	-0,46	1	-0,85	-6,88	-1,75	1,87	-0,58	-1	-1,15	1	-0,23	0,9	1,97
-14,69	0,1	-1,8	0,05	0,1	-0,46	2	-0,85	-4,88	-1,75	-4,13	-2,58	-2	-2,15	1	-0,23	0,9	1,97
49,31	0,1	-1,8	0,05	0,1	-0,46	2	9,15	7,12	6,25	-2,13	11,42	7	6,85	1	-0,23	0,9	1,97
-25,19	0,1	0,2	0,05	-1,9	-0,96	-1	-0,85	-0,88	-6,75	-2,13	-3,58	-4	-4,15	1	-0,23	-2,1	1,97
10,81	0,1	0,2	0,05	-1,9	0,04	1	-0,85	-0,88	-3,75	-0,13	4,42	11	6,85	-3	-0,23	-0,1	-2,03
26,81	0,1	0,2	0,05	0,1	0,04	1	1,15	-4,88	2,25	1,87	11,42	11	10,85	1	-0,23	-2,1	-7,03
1,81	-1,9	-1,8	0,05	0,1	0,04	-1	-0,85	-0,88	-6,75	9,87	-2,58	-3	-4,15	1	-0,23	11,9	1,97
-6,19	-1,9	-1,8	-9,95	0,1	0,04	-1	-0,85	-0,88	-5,75	-5,13	-0,58	4	-1,15	1	-0,23	-0,1	17,97
-10,69	0,1	0,2	-7,95	0,1	-0,46	0	-0,85	7,12	-1,75	-0,13	-2,58	-2	-3,15	1	-0,23	-2,1	1,97
19,31	0,1	0,2	-5,95	0,1	-0,46	0	1,15	-4,88	6,25	-2,13	7,42	7	10,85	1	-0,23	0,9	-2,03
-31,19	0,1	0,2	0,05	0,1	0,04	-1	-0,85	-0,88	-6,75	-2,13	-3,58	-1	-3,15	-11	-0,23	-0,1	-1,03
-21,69	0,1	0,2	-5,95	0,1	-0,46	-1	-0,85	-0,88	-3,75	-4,13	-3,58	-4	-4,15	1	-0,23	3,9	1,97
-25,69	0,1	0,2	-5,95	0,1	-0,46	-1	5,15	-0,88	2,25	-2,13	-3,58	-4	-2,15	-11	-0,23	-4,1	1,97
26,81	0,1	0,2	0,05	0,1	0,04	1	1,15	-4,88	2,25	1,87	11,42	11	10,85	1	-0,23	-5,1	-4,03
-25,69	0,1	0,2	-5,95	0,1	-0,46	0	1,15	-4,88	-3,75	-0,13	-1,58	-3	-1,15	1	-0,23	-5,1	-2,03
3,31	-1,9	0,2	0,05	0,1	0,54	-1	-0,85	-4,88	2,25	11,87	-0,58	-3	-1,15	1	-1,23	-0,1	1,97
-15,19	-1,9	-1,8	-5,95	0,1	-0,96	-1	-0,85	7,12	-6,75	-2,13	-0,58	-3	-1,15	1	0,77	-0,1	1,97
-25,69	-1,9	-1,8	0,05	0,1	-0,46	-1	-0,85	-4,88	-1,75	-4,13	-3,58	-4	-3,15	1	-1,23	-0,1	1,97
21,81	-1,9	0,2	4,05	0,1	0,04	-1	-0,85	-0,88	22,25	-4,13	-3,58	-4	-4,15	1	0,77	3,9	9,97

3.3.4. Réduction du tableau de données centrées (matrice centre réduite)

La réduction permet d'accorder la même importance pour toutes les variables. Ne pas réduire permet de donner plus d'importance aux variables qui ont une variabilité plus grande (une variance plus grande).

La matrice centrée réduite est déterminée en divisant les valeurs centrées des variables par l'écart type, conformément à la relation (2.13). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.5. Les nouvelles valeurs représentent les valeurs centrées avec la même importance.

Tableau 3.5 : Matrice des données centres réduites.

Iv	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action de vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de couloir	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
-1,05	-0,75	0,13	0,91	0,23	0,05	0,00	-0,43	-0,19	-0,98	-1,10	-0,77	-0,85	-0,90	0,31	1,24	1,62	-1,16
0,56	-0,75	0,13	2,70	0,23	0,05	-0,96	-0,43	1,52	-0,11	0,50	0,09	-0,42	-1,08	0,31	-0,37	1,62	-1,16
-0,67	-0,75	0,13	0,91	0,23	-1,20	-0,96	-0,43	-0,19	-0,84	0,50	-0,77	-1,00	-0,90	0,31	2,85	1,62	-1,16
1,67	-0,75	0,13	0,91	0,23	0,68	-0,96	-0,43	1,52	3,24	0,50	0,31	0,42	0,84	0,31	-0,37	0,37	-1,16
-0,27	-0,75	0,13	0,91	0,23	0,68	-0,96	-0,43	-0,19	-0,98	2,10	-0,77	-0,42	-0,25	0,31	-0,37	0,37	-0,39
0,37	2,42	0,13	0,91	0,23	2,45	0,96	-0,43	1,52	-0,25	0,50	-0,34	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	0,37	-1,16
0,44	2,42	0,13	0,91	0,23	0,58	0,96	-0,43	-0,19	-0,25	0,50	-0,34	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	0,37	0,38
0,27	2,42	0,13	0,91	0,23	0,05	0,96	-0,43	-0,19	-0,25	0,50	-0,34	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	0,37	-0,39
-0,22	2,42	0,13	0,91	0,23	0,58	0,96	0,08	-0,19	-0,25	-0,57	-0,34	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	-0,87	-1,16
0,96	2,42	0,13	0,91	0,23	1,83	0,96	1,61	-0,19	0,91	0,50	-0,34	-0,42	-0,25	0,31	-0,37	-0,87	1,15
-0,83	-0,75	-1,21	0,01	0,23	1,93	0,96	-0,43	-1,04	-0,55	0,50	-0,34	-0,42	-0,47	0,31	-0,37	-0,87	-0,39
-0,65	-0,75	-1,21	0,01	0,23	1,93	0,00	-0,43	-1,47	0,33	0,50	-0,12	-0,63	-0,25	0,31	-0,37	-0,87	-0,39
-0,01	-0,75	0,13	0,91	0,23	1,30	-0,96	-0,43	1,52	0,33	-1,10	-0,12	0,42	-0,25	3,40	2,85	1,62	-1,02
-0,13	-0,75	0,13	0,91	0,23	0,58	-0,96	-0,43	-0,19	-0,84	-1,10	-0,77	-0,85	-0,90	0,31	1,24	1,62	2,69
0,65	0,04	2,82	0,01	0,23	1,30	-0,96	-0,43	1,52	0,91	0,50	-0,12	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	-2,12	0,38
-1,00	0,04	0,13	0,01	0,23	0,05	0,96	-0,43	-0,19	-0,98	-0,57	-0,34	-0,85	-0,68	0,31	1,24	-1,70	-0,20
2,16	0,04	0,13	0,01	0,23	0,05	1,92	0,59	1,52	0,91	0,50	2,46	2,33	2,35	0,31	-0,37	-2,12	-0,39
-0,29	0,04	2,82	0,01	0,23	1,30	-0,96	-0,43	-0,19	-0,98	-0,57	-0,77	-0,21	0,18	0,31	1,24	-0,04	0,38
1,83	0,04	2,82	0,01	0,23	1,30	0,96	0,59	1,52	0,91	-0,57	1,60	1,48	1,49	0,31	1,24	0,37	-0,78
-0,69	-0,75	-1,21	0,01	0,23	1,93	0,00	-0,43	-1,26	-0,11	0,50	-0,12	-0,42	-0,25	0,31	-0,37	-0,87	-0,39
-0,48	-0,75	0,13	1,78	0,23	1,30	0,00	0,08	0,67	0,91	-0,57	-0,55	-0,42	-0,25	0,31	-0,37	-0,87	-0,39
-0,65	0,04	-1,21	1,33	0,23	0,58	0,96	-0,43	-1,47	-0,25	0,50	-0,12	-0,21	-0,25	0,31	-0,37	0,37	0,38
-0,69	0,04	-1,21	0,01	0,23	0,58	1,92	-0,43	-1,04	-0,25	-1,10	-0,55	-0,42	-0,47	0,31	-0,37	0,37	0,38
2,33	0,04	-1,21	0,01	0,23	0,58	1,92	4,67	1,52	0,91	-0,57	2,46	1,48	1,49	0,31	-0,37	0,37	0,38
-1,19	0,04	0,13	0,01	4,30	1,20	-0,96	-0,43	-0,19	-0,98	-0,57	-0,77	-0,85	-0,90	0,31	-0,37	-0,87	0,38
0,51	0,04	0,13	0,01	4,30	0,05	0,96	-0,43	-0,19	-0,55	-0,03	0,95	2,33	1,49	0,93	-0,37	-0,04	-0,39
1,26	0,04	0,13	0,01	0,23	0,05	0,96	0,59	-1,04	0,33	0,50	2,46	2,33	2,35	0,31	-0,37	-0,87	-1,35
0,09	-0,75	-1,21	0,01	0,23	0,05	-0,96	-0,43	-0,19	-0,98	2,63	-0,55	-0,63	-0,90	0,31	-0,37	4,94	0,38
-0,29	-0,75	-1,21	2,23	0,23	0,05	-0,96	-0,43	-0,19	-0,84	-1,37	-0,12	0,85	-0,25	0,31	-0,37	-0,04	3,46
-0,50	0,04	0,13	1,78	0,23	0,58	0,00	-0,43	1,52	-0,25	-0,03	-0,55	-0,42	-0,68	0,31	-0,37	-0,87	0,38

0,91	0,04	0,13	-1,33	0,23	-0,58	0,00	0,59	-1,04	0,91	-0,57	1,60	1,48	2,35	0,31	-0,37	0,37	-0,39
-1,47	0,04	0,13	0,01	0,23	0,05	-0,96	-0,43	-0,19	-0,98	-0,57	-0,77	-0,21	-0,68	3,40	-0,37	-0,04	-0,20
-1,02	0,04	0,13	-1,33	0,23	-0,58	-0,96	-0,43	-0,19	-0,55	-1,10	-0,77	-0,85	-0,90	0,31	-0,37	1,62	0,38
-1,21	0,04	0,13	-1,33	0,23	-0,58	-0,96	2,63	-0,19	0,33	-0,57	-0,77	-0,85	-0,47	3,40	-0,37	-1,70	0,38
1,26	0,04	0,13	0,01	0,23	0,05	0,96	0,59	-1,04	0,33	0,50	2,46	2,33	2,35	0,31	-0,37	-2,12	-0,78
-1,21	0,04	0,13	-1,33	0,23	-0,58	0,00	0,59	-1,04	-0,55	-0,03	-0,34	-0,63	-0,25	0,31	-0,37	-2,12	-0,39
0,16	-0,75	0,13	0,01	0,23	0,68	-0,96	-0,43	-1,04	0,33	3,17	-0,12	-0,63	-0,25	0,31	-1,98	-0,04	0,38
-0,72	-0,75	-1,21	-1,33	0,23	-1,20	-0,96	-0,43	1,52	-0,98	-0,57	-0,12	-0,63	-0,25	0,31	1,24	-0,04	0,38
-1,21	-0,75	-1,21	0,01	0,23	-0,58	-0,96	-0,43	-1,04	-0,25	-1,10	-0,77	-0,85	-0,68	0,31	-1,98	-0,04	0,38
1,03	-0,75	0,13	0,91	0,23	0,05	-0,96	-0,43	-0,19	3,24	-1,10	-0,77	-0,85	-0,90	0,31	1,24	1,62	1,92

Les données sont centrées réduites, c'est-à-dire que chaque variable a une moyenne nulle et une variance égale à 1. Enfin, la matrice des corrélations est déterminée en pré multipliant la matrices des variables centrées réduite par sa transposées conformément à la relation (2.26). Les résultats de la matrice de corrélation sont donnés dans le tableau 3.6 par le logiciel R® après avoir effectué ces étapes.

Tableau 3.6 : Matrice de corrélation avec Iv.

	Iv	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
Iv	1	0,18	0,27	0,29	0,08	0,04	0,40	0,41	0,42	0,65	0,20	0,77	0,71	0,73	0,24	- 0,03	0,01	- 0,10
Implantation de la retenue	0,18	1	0,19	0,20	- 0,01	- 0,48	0,51	0,16	0,06	- 0,03	0,03	0,03	0,06	0,07	0,06	- 0,18	- 0,20	- 0,13
Zone sismique	0,27	0,19	1	0,17	- 0,03	0,19	- 0,13	- 0,05	0,36	0,16	- 0,04	0,06	0,14	0,18	- 0,04	0,27	- 0,17	- 0,16
Type de sol	0,29	0,20	0,17	1	- 0,00	0,01	0,03	- 0,14	0,16	0,12	0,22	- 0,04	- 0,07	- 0,09	0,04	0,21	0,31	- 0,32
Action de neige	0,08	- 0,01	- 0,03	- 0,00	1	0,14	-	0,10	0,04	0,18	0,07	- 0,02	- 0,17	- 0,07	0,07	0,08	0,08	0,00
Action du vent	0,04	- 0,48	0,19	0,01	0,14	1	- 0,12	- 0,20	- 0,08	0,18	0,15	0,08	0,09	0,10	- 0,07	0,04	- 0,10	- 0,13
Etanchéité du corps de la retenue	0,40	0,51	- 0,13	0,03	0,00	- 0,12	1	0,37	- 0,05	0,08	- 0,01	0,55	0,49	0,49	0,24	- 0,16	- 0,33	- 0,27
Type de protection du talus amont de la retenue	0,41	0,16	- 0,05	- 0,14	0,10	- 0,20	0,37	1	0,15	0,28	- 0,10	0,50	0,34	0,42	- 0,15	- 0,12	- 0,23	0,01
Type de protection du talus aval de la retenue	0,42	0,06	0,36	0,16	0,04	- 0,08	- 0,05	0,15	1	0,26	- 0,11	0,15	0,15	0,09	- 0,10	0,28	0,09	- 0,10
type de revêtements de la crête de la retenue	0,65	- 0,03	0,16	0,12	0,18	0,18	0,08	0,28	0,26	1	- 0,01	0,35	0,26	0,36	0,05	- 0,07	- 0,10	- 0,03
Type de déversoir	0,20	0,03	- 0,04	0,22	0,07	0,15	- 0,01	- 0,10	- 0,11	- 0,01	1	0,09	0,01	0,08	0,21	- 0,37	0,09	- 0,27
Type de coursier	0,77	0,03	0,06	- 0,04	- 0,02	0,08	0,55	0,50	0,15	0,35	0,09	1	0,91	0,94	0,13	- 0,12	- 0,27	- 0,28
Type de murs bajoyers	0,71	0,06	0,14	- 0,07	- 0,17	0,09	0,49	0,34	0,15	0,26	0,01	0,91	1	0,94	- 0,01	- 0,05	- 0,22	- 0,23
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,73	0,07	0,18	- 0,09	- 0,07	0,10	0,49	0,42	0,09	0,36	0,08	0,94	0,94	1	0,09	- 0,14	- 0,32	- 0,31
Type de conduit de vidange	0,24	0,06	- 0,04	0,04	0,07	- 0,07	0,24	- 0,15	- 0,10	0,05	0,21	0,13	- 0,01	0,09	1	- 0,19	0,01	0,03
Destination de la retenue	- 0,03	- 0,18	0,27	0,21	0,08	0,04	- 0,16	- 0,12	0,28	- 0,07	- 0,37	- 0,12	- 0,05	- 0,14	- 0,19	1	0,30	- 0,03
Etat d'envasement de la cuve	0,01	- 0,20	- 0,17	0,31	0,08	- 0,10	- 0,33	- 0,23	0,09	- 0,10	0,09	- 0,27	- 0,22	- 0,32	0,01	0,30	1	0,12
Fréquence d'entretien	- 0,10	- 0,13	- 0,16	- 0,32	0,00	- 0,13	- 0,27	0,01	- 0,10	- 0,03	- 0,27	- 0,28	- 0,23	- 0,31	0,03	- 0,03	0,12	1

L'analyse de la matrice de corrélation montre la présence des corrélations entre les variables et que la matrice de corrélation s'écarte significativement de la matrice unité ; ce qui signifie que la factorisation des variables est possible.

3.4. Vérification des conditions d'application de l'ACP

- **Test de sphéricité de Bartlett** : le logiciel R[®] donne une $p\text{-value} = 2.20 \times 10^{-16}$ qui est inférieur au seuil alpha ($\alpha = 5\%$). Nous concluons que le test de sphéricité de Bartlett est significatif, ce qui nous autorise à rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle toutes les corrélations seraient égales à zéro.

- **Non singularité de la matrice des corrélations** : Le déterminant de la matrice de corrélation est égal à -1.79×10^{-9} qui est une valeur négative. Cela signifie que notre matrice est singulière. La raison est que la variable Iv (indice de vulnérabilité) est obtenue en faisant la somme des autres variables, qui est donc parfaitement corrélée avec l'ensemble des variables, puisqu'elle est une combinaison linéaire de ces dernières. D'où l'ACP n'est pas applicable.

Afin de poursuivre notre ACP, nous devons supprimer cette colonne Iv. Ainsi nos nouvelles variables seront réduites à 17 paramètres (tableau 3.7) :

Tableau 3. 7 : Nouveau tableau de données ACP

Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
4	4	16	4	5	2	2	8	3	2	1	1	1	16	3	12	4
4	4	24	4	5	1	2	16	9	8	5	3	3	16	2	12	4
4	4	16	4	4	1	2	8	4	8	1	3	1	16	4	12	4
4	4	16	4	5,5	1	2	16	32	8	6	7	9	16	2	9	4
4	4	16	4	5,5	1	2	8	3	14	1	3	4	16	2	9	8
12	4	16	4	3	3	2	16	8	8	3	4	4	16	2	9	4
12	4	16	4	4,5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	12
12	4	16	4	5	3	2	8	8	8	3	4	4	16	2	9	8
12	4	16	4	4,5	3	3	8	8	4	3	4	4	16	2	6	4
12	4	16	4	3,5	3	6	8	16	8	3	3	4	16	2	6	16
4	2	12	4	6,5	3	2	4	6	8	3	3	3	16	2	6	8
4	2	12	4	6,5	2	2	2	12	8	4	2	4	16	2	6	8
4	4	16	4	6	1	2	16	12	2	4	7	4	4	4	12	8

4	4	16	4	4,5	1	2	8	4	2	1	1	1	16	3	12	24
6	8	12	4	6	1	2	16	16	8	4	4	4	16	2	3	12
6	4	12	4	5	3	2	8	3	4	3	1	2	16	3	4	9
6	4	12	4	5	4	4	16	16	8	16	16	16	16	2	3	8
6	8	12	4	6	1	2	8	3	4	1	4	6	16	3	8	12
6	8	12	4	6	3	4	16	16	4	12	12	12	16	3	9	6
4	2	12	4	6,5	2	2	3	9	8	4	3	4	16	2	6	8
4	4	4	4	6	2	3	12	16	4	2	3	4	16	2	6	8
6	2	6	4	4,5	3	2	2	8	8	4	4	4	16	2	9	12
6	2	12	4	4,5	4	2	4	8	2	2	3	3	16	2	9	12
6	2	12	4	4,5	4	12	16	16	4	16	12	12	16	2	9	12
6	4	12	2	4	1	2	8	3	4	1	1	1	16	2	6	12
6	4	12	2	5	3	2	8	6	6	9	16	12	12	2	8	8
6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	6	3
4	2	12	4	5	1	2	8	3	16	2	2	1	16	2	20	12
4	2	2	4	5	1	2	8	4	1	4	9	4	16	2	8	28
6	4	4	4	4,5	2	2	16	8	6	2	3	2	16	2	6	12
6	4	6	4	4,5	2	4	4	16	4	12	12	16	16	2	9	8
6	4	12	4	5	1	2	8	3	4	1	4	2	4	2	8	9
6	4	6	4	4,5	1	2	8	6	2	1	1	1	16	2	12	12
6	4	6	4	4,5	1	8	8	12	4	1	1	3	4	2	4	12
6	4	12	4	5	3	4	4	12	8	16	16	16	16	2	3	6
6	4	6	4	4,5	2	4	4	6	6	3	2	4	16	2	3	8
4	4	12	4	5,5	1	2	4	12	18	4	2	4	16	1	8	12
4	2	6	4	4	1	2	16	3	4	4	2	4	16	3	8	12
4	2	12	4	4,5	1	2	4	8	2	1	1	2	16	1	8	12
4	4	16	4	5	1	2	8	32	2	1	1	1	16	3	12	20

La nouvelle matrice de corrélation obtenue avec le logiciel R[®] est présentée dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Matrice de corrélation sans l'indice de vulnérabilité Iv

	Implantation de la retenue	Zone sismique	Type de sol	Action de neige	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de protection du talus aval de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de déversoir	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Type de conduite de vidange	Destination de la retenue	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
Implantation de la retenue	1	0,19	0,20	- 0,01	- 0,48	0,51	0,16	0,06	- 0,03	0,03	0,03	0,06	0,07	0,06	- 0,18	- 0,20	- 0,13
Zone sismique	0,19	1	0,17	- 0,03	0,19	- 0,13	- 0,05	0,36	0,16	- 0,04	0,06	0,14	0,18	- 0,04	0,27	- 0,17	- 0,16
Type de sol	0,20	0,17	1	- 0,00	0,01	0,03	- 0,14	0,16	0,12	0,22	- 0,04	- 0,07	- 0,09	0,04	0,21	0,31	- 0,32
Action de neige	- 0,01	- 0,03	- 0,00	1	0,14	0,00	0,10	0,04	0,18	0,07	- 0,02	- 0,17	- 0,07	0,07	0,08	0,08	0,00
Action du vent	- 0,48	0,19	0,01	0,14	1	- 0,12	- 0,20	- 0,08	0,18	0,15	0,08	0,09	0,10	- 0,07	0,04	- 0,10	- 0,13
Etanchéité du corps de la retenue	0,51	- 0,13	0,03	0,00	-0,12	1	0,37	- 0,05	0,08	- 0,01	0,55	0,49	0,49	0,24	- 0,16	- 0,33	- 0,27
Type de protection du talus amont de la retenue	0,16	- 0,05	- 0,14	0,10	- 0,20	0,37	1	0,15	0,28	- 0,10	0,50	0,34	0,42	- 0,15	- 0,12	- 0,23	0,01
Type de protection du talus aval de la retenue	0,06	0,36	0,16	0,04	-0,08	- 0,05	0,15	1	0,26	- 0,11	0,15	0,15	0,09	- 0,10	0,28	0,09	- 0,10
type de revêtements de la crête de la retenue	- 0,03	0,16	0,12	0,18	0,18	0,08	0,28	0,26	1	- 0,01	0,35	0,26	0,36	0,05	- 0,07	- 0,10	- 0,03
Type de déversoir	0,03	- 0,04	0,22	0,07	0,15	- 0,01	- 0,10	- 0,11	- 0,01	1	0,09	0,01	0,08	0,21	- 0,37	0,09	- 0,27
Type de coursier	0,03	0,06	- 0,04	- 0,02	0,08	0,55	0,50	0,15	0,35	0,09	1	0,91	0,94	0,13	- 0,12	- 0,27	- 0,28
Type de murs bajoyers	0,06	0,14	- 0,07	- 0,17	0,09	0,49	0,34	0,15	0,26	0,01	0,91	1	0,94	- 0,01	- 0,05	- 0,22	- 0,23
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,07	0,18	- 0,09	- 0,07	0,10	0,49	0,42	0,09	0,36	0,08	0,94	0,94	1	0,09	- 0,14	- 0,32	- 0,31
Type de conduit de vidange	0,06	- 0,04	0,04	0,07	- 0,07	0,24	- 0,15	- 0,10	0,05	0,21	0,13	- 0,01	0,09	1	- 0,19	0,01	0,03
Destination de la retenue	- 0,18	0,27	0,21	0,08	0,04	- 0,16	- 0,12	0,28	- 0,07	- 0,37	- 0,12	- 0,05	- 0,14	- 0,19	1	0,30	- 0,03
Etat d'envasement de la cuve	- 0,20	- 0,17	0,31	0,08	- 0,10	- 0,33	- 0,23	0,09	- 0,10	0,09	- 0,27	- 0,22	- 0,32	0,01	0,30	1	0,12
Fréquence d'entretien	- 0,13	- 0,16	- 0,32	0,00	- 0,13	- 0,27	0,01	- 0,10	- 0,03	- 0,27	- 0,28	- 0,23	- 0,31	0,03	- 0,03	0,12	1

- Le test statistique de Bartlett sous le logiciel R[®] donne une valeur de **P-value** égale à 2.2×10^{-16} qui est inférieure au seuil alpha ($\alpha = 5\%$), donc les corrélations entre les variables sont significatives et l'hypothèse nulle est rejetée.
- Le déterminant de cette nouvelle matrice est égale à $3.45 \times 10^{-5} > 10^{-5}$, nous concluons que la matrice n'est pas singulière.

Après vérification du déterminant et du test de sphéricité de Bartlett, lesquels nous ont aidés à vérifier si dans l'ensemble une matrice de corrélation possède les propriétés souhaitées pour l'analyse en composantes principales, il est également important d'examiner chacune des variables de façon individuelle pour nous assurer que chacune d'elles est en relation avec d'autres variables. En inspectant, une par une, pour chaque rangée de la matrice de corrélation (tableau 3.5), nous constatons que les variables démontrent généralement au moins une corrélation substantielle avec une autre à l'exception de « Action de neige » et « Type de conduite de vidange ». Par ailleurs, la corrélation qui existe entre « zone sismique » et « Type de protection du talus aval de la retenue », « Type de déversoir » et « Destination de la retenue » sont des corrélations aberrantes, car elles ne possèdent aucuns liens physiques entre elles. A cet effet, il est recommandé de retrancher ces variables et de reprendre le calcul de l'ACP, car toutes les variables doivent faire partie de la solution dans le but de diminuer la perte d'information.

Une fois de plus la matrice de corrélation est recalculée sur la base du nouveau tableau de donnée composé de 11 paramètres (tableau 3.9). Cette nouvelle matrice de corrélation est donnée dans le tableau 3.10.

Tableau 3.9: Tableau de données finales

N°	Implantation de la retenue	Type de sol	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
1	4	16	5	2	2	3	1	1	1	12	4
2	4	24	5	1	2	9	5	3	3	12	4
3	4	16	4	1	2	4	1	3	1	12	4
4	4	16	5,5	1	2	32	6	7	9	9	4
5	4	16	5,5	1	2	3	1	3	4	9	8
6	12	16	3	3	2	8	3	4	4	9	4
7	12	16	4,5	3	2	8	3	4	4	9	12
8	12	16	5	3	2	8	3	4	4	9	8
9	12	16	4,5	3	3	8	3	4	4	6	4
10	12	16	3,5	3	6	16	3	3	4	6	16
11	4	12	6,5	3	2	6	3	3	3	6	8

12	4	12	6,5	2	2	12	4	2	4	6	8
13	4	16	6	1	2	12	4	7	4	12	8
14	4	16	4,5	1	2	4	1	1	1	12	24
15	6	12	6	1	2	16	4	4	4	3	12
16	6	12	5	3	2	3	3	1	2	4	9
17	6	12	5	4	4	16	16	16	16	3	8
18	6	12	6	1	2	3	1	4	6	8	12
19	6	12	6	3	4	16	12	12	12	9	6
20	4	12	6,5	2	2	9	4	3	4	6	8
21	4	4	6	2	3	16	2	3	4	6	8
22	6	6	4,5	3	2	8	4	4	4	9	12
23	6	12	4,5	4	2	8	2	3	3	9	12
24	6	12	4,5	4	12	16	16	12	12	9	12
25	6	12	4	1	2	3	1	1	1	6	12
26	6	12	5	3	2	6	9	16	12	8	8
27	6	12	5	3	4	12	16	16	16	6	3
28	4	12	5	1	2	3	2	2	1	20	12
29	4	2	5	1	2	4	4	9	4	8	28
30	6	4	4,5	2	2	8	2	3	2	6	12
31	6	6	4,5	2	4	16	12	12	16	9	8
32	6	12	5	1	2	3	1	4	2	8	9
33	6	6	4,5	1	2	6	1	1	1	12	12
34	6	6	4,5	1	8	12	1	1	3	4	12
35	6	12	5	3	4	12	16	16	16	3	6
36	6	6	4,5	2	4	6	3	2	4	3	8
37	4	12	5,5	1	2	12	4	2	4	8	12
38	4	6	4	1	2	3	4	2	4	8	12
39	4	12	4,5	1	2	8	1	1	2	8	12
40	4	16	5	1	2	32	1	1	1	12	20

Tableau 3.10 : Matrice de corrélation finale.

	Implantation de la retenue	Type de sol	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
Implantation de la retenue	1	0,20	- 0,48	0,51	0,16	- 0,03	0,03	0,06	0,07	- 0,20	- 0,13
Type de sol	0,20	1	0,01	0,03	- 0,14	0,12	- 0,04	- 0,07	- 0,09	0,31	- 0,32
Action du vent	- 0,48	0,01	1	- 0,12	- 0,20	0,18	0,08	0,09	0,10	- 0,10	- 0,13
Etanchéité du corps de la retenue	0,51	0,03	- 0,12	1	0,37	0,08	0,55	0,49	0,49	- 0,33	- 0,27
Type de protection du talus amont de la retenue	0,16	- 0,14	- 0,20	0,37	1	0,28	0,50	0,34	0,42	- 0,23	0,01
type de revêtements de la crête de la retenue	- 0,03	0,12	0,18	0,08	0,28	1	0,35	0,26	0,36	- 0,10	- 0,03
Type de coursier	0,03	- 0,04	0,08	0,55	0,50	0,35	1	0,91	0,94	- 0,27	- 0,28
Type de murs bajoyers	0,06	- 0,07	0,09	0,49	0,34	0,26	0,91	1	0,94	- 0,22	- 0,23
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,07	- 0,09	0,10	0,49	0,42	0,36	0,94	0,94	1	- 0,32	- 0,31
Etat d'envasement de la cuve	- 0,20	0,31	- 0,10	- 0,33	- 0,23	- 0,10	- 0,27	- 0,22	- 0,32	1	0,12
Fréquence d'entretien	- 0,13	- 0,32	- 0,13	- 0,27	0,01	- 0,03	- 0,28	- 0,23	- 0,31	0,12	1

- La valeur de **p-value** obtenue est inférieure à 2.2×10^{-16} , (**p-value** < 0.05) nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle donc la corrélation entre les variables est significative.

-Le déterminant de cette nouvelle matrice est égal à $6.15 \times 10^{-4} > 10^{-5}$ nous concluons que notre matrice n'est pas singulière.

L'analyse de la nouvelle matrice de corrélation montre qu'il existe au moins deux corrélations entre les variables. Maintenant que nous avons notre matrice de corrélation finale, il y a lieu de connaître le seuil de corrélation significative

◆ **Seuil de corrélation significative (Coefficient de corrélation de Bravais-Pearson « r_{critique} »**

Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. C'est une mesure de la liaison linéaire, c'est à dire de la capacité de prédire une variable x par une autre variable y à l'aide d'un modèle linéaire.

Lorsque « r » est calculé sur un échantillon, on est amené à tester sa significativité. Pour un **risque d'erreur alpha (α) fixé**, le degré de signification varie en fonction du nombre d'individus de la distribution. La table de **Bravais-Pearson** (tableau 3.11) fournit les valeurs critiques de r au-delà desquelles les coefficients de corrélation obtenus sont significatifs. Pour des échantillons de taille n, le degré de liberté **d.d.l = n-2**.

- Si « r » calculé est strictement inférieur à r_{critique} , au seuil α choisi et à d.d.l= n-2, il n'est pas possible de conclure à une relation entre les deux variables.
- Si « r » calculé est supérieur ou égale à r_{critique} , il existe bien une relation entre les deux variables. A ce moment-là, le signe de r calculé va permettre d'indiquer le sens de la liaison.

Nous présentons dans le tableau 3.11 ci-dessous la table de Bravais-Pearson aux niveaux de signification : $\alpha = 10\%$, 5% , 2% , 1% , 0.1% .

Tableau 3.11 : Table de Bravais-Pearson (Dagnelie, 2011)

α	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,988	0,997	0,9995	0,9999	
2	0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
3	0,805	0,878	0,934	0,959	0,991
4	0,729	0,811	0,882	0,917	0,974
5	0,669	0,754	0,833	0,874	0,950
6	0,622	0,707	0,789	0,834	0,924
7	0,582	0,666	0,750	0,798	0,898
8	0,549	0,632	0,716	0,765	0,872

9	0,521	0,602	0,685	0,735	0,847
10	0,497	0,576	0,658	0,708	0,823
11	0,476	0,553	0,634	0,684	0,801
12	0,458	0,532	0,612	0,661	0,780
13	0,441	0,514	0,592	0,641	0,760
14	0,426	0,497	0,574	0,623	0,741
15	0,412	0,482	0,558	0,606	0,724
16	0,400	0,468	0,542	0,590	0,708
17	0,389	0,456	0,528	0,575	0,693
18	0,378	0,444	0,516	0,561	0,678
19	0,369	0,433	0,503	0,549	0,665
20	0,360	0,423	0,492	0,537	0,652
21	0,352	0,413	0,482	0,526	
22	0,344	0,404	0,472	0,515	
23	0,337	0,396	0,462	0,505	
24	0,330	0,388	0,453	0,496	
25	0,323	0,381	0,445	0,487	0,597
26	0,317	0,374	0,437	0,479	
27	0,311	0,367	0,430	0,471	
28	0,306	0,361	0,423	0,463	
29	0,301	0,355	0,416	0,456	
30	0,296	0,349	0,409	0,449	0,554
35	0,275	0,325	0,381	0,418	0,518
40	0,257	0,304	0,358	0,393	0,498
45	0,243	0,288	0,338	0,372	0,464
50	0,231	0,273	0,322	0,354	0,443
60	0,211	0,250	0,295	0,325	0,407
70	0,195	0,232	0,274	0,303	0,397
80	0,183	0,217	0,256	0,283	0,356
90	0,173	0,205	0,242	0,267	0,337
100	0,164	0,195	0,230	0,254	0,321

Dans le cas de notre étude, le nombre d'individus est égal à 40. Donc le d.d.l vaut 38. Du (tableau 3.11), nous obtenons par interpolation $r_{\text{critique}} = 0.312$ au seuil de $\alpha = 0.05$. Cela signifie qu'au-delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. On peut déduire les corrélations significatives grâce à la table de Bravais-Pearson, et au des niveaux de signification suivant :

- au seuil des 5 %, nous avons des corrélations **significatives (*)**
- au seuil des 1 %, nous avons des corrélations **hautement significatives (**)**
- au seuil des 0.1 %, nous avons des corrélations **très hautement significatives (***)**.

Les résultats de ces corrélations significatives sont illustrés dans le tableau 3.12

Tableau 3.12 : Matrice des corrélations finale

	Implantation de la retenue	Type de sol	Action du vent	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de revêtements de la crête de la retenue	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie	Etat d'envasement de la cuve	Fréquence d'entretien
Implantation de la retenue	1	0,20	- 0,48 **	0,51 ***	0,16	- 0,03	0,03	0,06	0,07	- 0,20	- 0,13
Type de sol	0,20	1	0,01	0,03	- 0,14	0,12	- 0,04	- 0,07	- 0,09	0,31 *	- 0,32 *
Action du vent	- 0,48 **	0,01	1	- 0,12	- 0,20	0,18	0,08	0,09	0,10	- 0,10	- 0,13
Etanchéité du corps de la retenue	0,51 ***	0,03	- 0,12	1	0,37 *	0,08	0,55 ***	0,49 **	0,49 **	- 0,33 *	- 0,27
Type de protection du talus amont de la retenue	0,16	- 0,14	- 0,20	0,37 *	1	0,28	0,50 **	0,34 *	0,42 **	- 0,23	0,01
type de revêtements de la crête de la retenue	- 0,03	0,12	0,18	0,08	0,28	1	0,35 *	0,26	0,36 *	- 0,10	- 0,03
Type de coursier	0,03	- 0,04	0,08	0,55 ***	0,50 **	0,35 *	1	0,91 ***	0,94 ***	- 0,27	- 0,28
Type de murs bajoyers	0,06	- 0,07	0,09	0,49 **	0,34 *	0,26	0,91	1	0,94 ***	- 0,22	- 0,23
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,07	- 0,09	0,10	0,49 **	0,42 **	0,36 *	0,94 ***	0,94 ***	1	- 0,32 *	- 0,31 *
Etat d'envasement de la cuve	- 0,20	0,31 *	- 0,10	- 0,33 *	- 0,23	- 0,10	- 0,27	- 0,22	- 0,32	1	0,12
Fréquence d'entretien	- 0,13	- 0,32 *	- 0,13	- 0,27	0,01	- 0,03	- 0,28	- 0,23	- 0,31 *	0,12	1

Après analyse de cette matrice de corrélations, nous déduisons :

- Une corrélation significative (*) positive entre :

Type de sol et Etat d'envasement de la cuve ($r = 0.31$).

Etanchéité du corps de la retenue et Type de protection du talus amont de la retenue ($r = 0.37$).

Type de revêtement de la crête de la retenue et Type de coursier ($r = 0.35$).

Type de revêtement de la crête de la retenue et Type de bassin de dissipation d'énergie ($r = 0.36$).

Type de murs bajoyers et Type de protection du talus amont de la retenue ($r = 0.34$).

- Une corrélation significative (*) négative entre :

Type de sol et Fréquence d'entretien ($r = -0.32$).

Etanchéité du corps de la retenue et Etat d'envasement de la cuve ($r = -0.33$).

Type de bassin de dissipation d'énergie et Fréquence d'entretien ($r = -0.31$).

Etat d'envasement de la cuve et Type de bassin de dissipation d'énergie ($r = -0.32$).

- Des corrélations hautement significatives (**) positive entre :

Etanchéité du corps de la retenue et Type des murs bajoyers ($r = 0.49$).

Etanchéité du corps de la retenue et Type de bassin de dissipation d'énergie ($r = 0.49$).

Type de protection du talus amont de la retenue et Type de coursier ($r = 0.50$).

Type de protection du talus amont de la retenue et Type de bassin de dissipation d'énergie ($r = 0.42$).

Type de bassin de dissipation d'énergie et Etanchéité du corps de la retenue ($r = 0.49$)

- Des corrélations hautement significatives (**) négative entre :

Action du vent et Implantation de la retenue ($r = -0.48$).

- Des corrélations très hautement significatives (***) positive entre :

Etanchéité du corps de la retenue et Implantation de la retenue ($r = 0.51$).

Type de coursier et Etanchéité du corps de la retenue ($r = 0.55$)

Type de bassin de dissipation d'énergie et Type de coursier ($r = 0.94$).

Type de bassin de dissipation d'énergie et Type des murs bajoyers ($r = 0.94$).

Type de coursier et Type des murs bajoyers ($r = 0.91$).

Remarque : Les variables corrélés négativement sont des variables de sens opposés, autrement dit lorsque l'une augmente l'autre diminue. Les variables corrélées positivement sont des variables presque identiques et évoluent dans le même sens.

Ces niveaux de significations sont bien illustrés dans la représentation graphique de la matrice de corrélation donnée par le logiciel R® (figure 1.3).

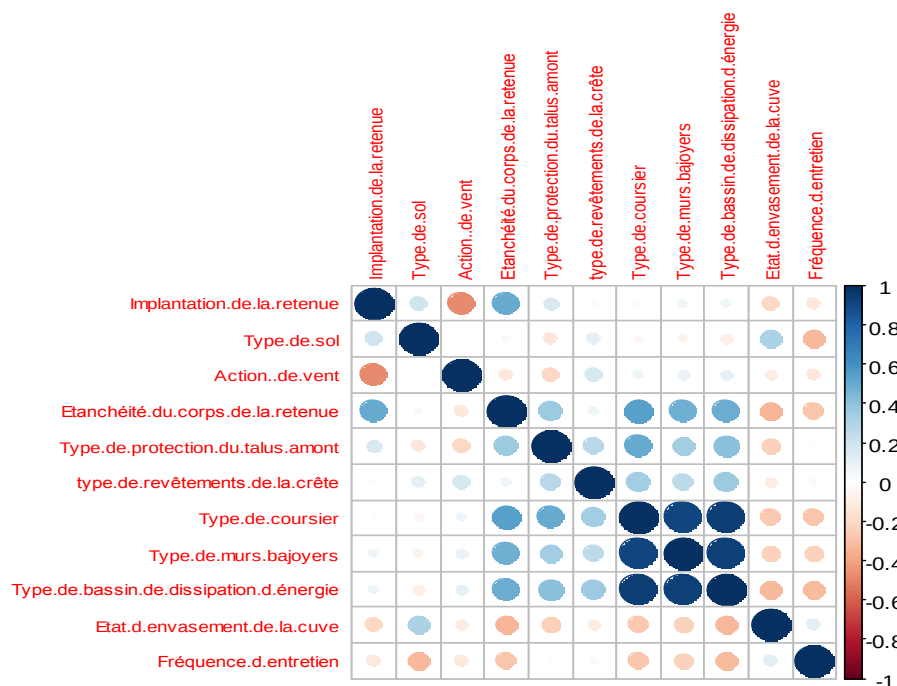


Figure 3.2 : Représentation graphique de la matrice des corrélations et des niveaux de signification

3.5. Choix du nombre d'axe à retenir

Pour sélectionner le nombre d'axe à retenir, il y'a lieu de vérifier les deux critères empiriques suivants :

- **Critère du coude de Cattell** : il consiste à détecter un coude sur le diagramme des valeurs propres, qui représentent le nombre de facteurs au-delà duquel l'information ajoutée est peu pertinente.
- **Le critère de Kaiser** qui consiste à ne retenir que les axes dont les valeurs propres sont supérieures à 1.

Avant de passer à la sélection des axes, visualisons le tableau des vecteurs propres et valeurs propres.

3.5.1. Vecteurs propres

Les vecteurs propres sont les axes principaux d'inertie maximum associés aux valeurs propres. Ils sont donnés par le logiciel R[®] conformément à la relation (2.18). Les résultats sont illustrés dans le tableau 3.13.

Tableau 3.13: Vecteurs propres

	Dim. 1	Dim. 2	Dim. 3	Dim. 4	Dim. 5	Dim. 6	Dim. 7	Dim. 8	Dim. 9	Dim. 10	Dim. 11
Implantation de la retenue	0,12	-0,64	0,07	-0,06	0,20	0,31	-0,05	0,05	0,63	0,12	-0,10
Type de sol	-0,03	-0,16	0,70	0,23	0,14	0,04	0,22	-0,57	-0,19	-0,03	0,07
Action de vent	0,02	0,57	0,18	-0,32	0,26	0,14	0,53	0,08	0,41	0,04	-0,03
Etanchéité du corps de la retenue	0,35	-0,33	0,03	-0,19	0,01	0,20	0,49	0,43	-0,49	-0,08	0,11
Type de protection du talus amont	0,29	-0,13	-0,28	0,35	0,17	-0,66	0,39	-0,09	0,22	-0,13	0,04
type de revêtements de la crête	0,20	0,21	0,10	0,46	0,67	0,16	-0,31	0,32	-0,12	-0,07	-0,05
Type de coursier	0,48	0,13	0,02	0,10	-0,20	0,01	0,01	-0,10	-0,10	0,61	-0,56
Type de murs bajoyers	0,45	0,14	0,03	0,05	-0,32	0,24	-0,09	-0,14	0,14	-0,71	-0,24
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,48	0,14	0,02	0,03	-0,17	0,09	-0,18	-0,09	0,14	0,24	0,77
Etat d'envasement de la cuve	-0,22	0,04	0,31	0,55	-0,48	0,03	0,17	0,49	0,22	0,05	0,03
Fréquence d'entretien	-0,18	0,04	-0,54	0,39	0,01	0,56	0,32	-0,31	-0,07	0,07	0,07

3.5.2. Valeurs propres et leurs variance

Les valeurs propres représentent la variance (l'inertie) expliquée par chaque facteur. Ces valeurs propres et leur pourcentage sont déterminés à partir du logiciel R[®] conformément aux relations (2.19) et (2.21) respectivement. Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.14.

Tableau 3.14 : Valeurs propres et leur variance associée.

	eigenvalue	percentage of variance	cumulative percentage of variance
comp 1	3,90	35,46	35,46
comp 2	1,76	16,03	51,49
comp 3	1,47	13,39	64,88
comp 4	1,09	9,96	74,84
comp 5	0,91	8,25	83,09
comp 6	0,61	5,5	88,59
comp 7	0,51	4,67	93,26
comp 8	0,39	3,53	96,79
comp 9	0,26	2,4	99,18
comp 10	0,06	0,5	99,68
comp 11	0,03	0,32	100
Σ	11	100	

On remarque que la somme des valeurs propres est égale à p nombre des variables ($p=11$). Effectivement, comme nous sommes dans une ACP normée, la variance de chaque variable vaut 1. La trace de la matrice de corrélation est égale à p nombre de variables et est égale à la somme des variances qui est l'inertie total du nuage de point. La qualité globale des représentations est mesurée par la part d'inertie expliquée qui est une mesure de la dispersion des observations autour du centre de gravité (la moyenne).

Après analyse des résultats, le **Critère de Kaiser** nous conduit à retenir **3 axes** principaux, avec un taux d'information ou d'inertie égale à **64.88%**.

- le premier axe présente un taux d'inertie de 35.46 % ;
- le deuxième axe présente un taux d'inertie de 16.03 % ;
- le troisième axe présente un taux d'inertie de 13.39 %.

La règle du **coude de Cattell** montre que l'information à rajouter est peu pertinente à partir du 4ème axe (figure 3.3), ce qui confirme le choix de 03 axes.

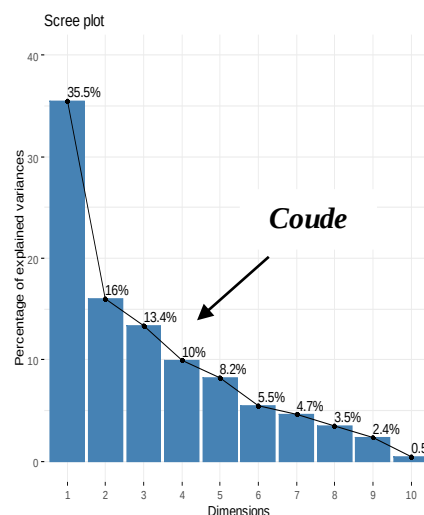


Figure 3.3 : Diagramme des valeurs propres.

3.6. Interprétation des résultats de l'ACP

3.6.1 Etude des variables

3.6.1.1. Coordonnées factorielles des variables

Les nouvelles variables, associées aux axes factoriels, sont appelées facteurs ou composantes principales. Elles s'expriment comme combinaisons linéaires des variables initiales. Les coefficients de ces combinaisons linéaires sont fournis par le logiciel R® (tableau 3.15) conformément à la relation (2.23), c'est eux qui définissent les nouveaux axes :

- ils permettent de calculer les nouvelles coordonnées d'un point-variable à partir des anciennes,
- ils permettent également de voir le poids d'une ancienne variable dans la définition d'un facteur. Le repérage des variables d'origine, correspondant aux coefficients les plus élevés en valeur absolu, permet de dégager une interprétation des facteurs. Cette interprétation est facilitée par l'examen des corrélations "anciennes- nouvelles" variables (qui sont d'ailleurs proportionnelles aux coefficients) représentées dans le cercle des corrélations (figure 4.2 et 4.3). Le nombre maximum de composantes principales qu'il est possible d'extraire d'une matrice de corrélation est égal au nombre de variables dans la matrice.

Tableau 3.15 : Coordonnées factorielles des variables.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Implantation de la retenue	0,24	-0,85	0,08
Type de sol	-0,06	-0,21	0,85
Action de vent	0,03	0,76	0,22
Etanchéité du corps de la retenue	0,69	-0,44	0,04
Type de protection du talus amont	0,58	-0,17	-0,34
type de revêtements de la crête	0,40	0,29	0,12
Type de coursier	0,94	0,17	0,03
Type de murs bajoyers	0,89	0,18	0,03
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,94	0,19	0,03
Etat d'envasement de la cuve	-0,44	0,06	0,38
Fréquence d'entretien	-0,35	0,05	-0,65

Après analyse des résultats, nous retenons ce qui suit :

- Les variables qui sont bien représenté sur l'axe 1 sont : étanchéité du corps de la retenue, type de protection du talus amont de la retenue, type de revêtement de la crête de la retenue, type de coursier, type des murs bajoyers, Type de bassin de dissipation d'énergie, Etat d'envasement de la cuve.
- Les variables qui sont bien représenté sur l'axe 2 sont : implantation de la retenue et action du vent.

- Enfin, Les variables qui sont bien représenté sur l'axe 3 sont : type de sol et fréquence d'entretien.

3.6.1.2. Contribution des variables à l'inertie des axes

La contribution relative des variables à l'inertie des 3 axes est donnée par le logiciel R®. Les résultats sont illustrés dans le tableau 3.16.

Tableau 3.16 : Contribution des variables à l'inertie des axes.

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Implantation de la retenue	1,44	41,44	0,43
Type de sol	0,08	2,44	48,80
Action du vent	0,03	32,82	3,31
Etanchéité du corps de la retenue	12,29	11,01	0,12
Type de protection du talus amont	8,48	1,72	7,79
type de revêtements de la crête	4,12	4,61	0,96
Type de coursier	22,70	1,64	0,04
Type de murs bajoyers	20,20	1,91	0,06
Type de bassin de dissipation d'énergie	22,60	2,05	0,05
Etat d'envasement de la cuve	4,92	0,19	9,66
Fréquence d'entretien	3,15	0,17	28,77

Le repérage des variables, correspondant aux coefficients les plus élevés, permet de dégager les interprétations suivantes :

- Les variables ayant contribué à la formation du premier axe sont : étanchéité du corps de la retenue, type de protection du talus amont de la retenue, type de coursier, type de murs bajoyers et type de bassin de dissipation d'énergie. Ces variables expliquent **86.26%** de l'inertie totale de l'axe.
- Les variables implantation de la retenue, action du vent, type de revêtements de la crête de la retenue" expliquent **78.86%** de la formation du deuxième axe.
- Les variables Type de sol, état d'envasement de la cuve, fréquence d'entretien expliquent **87.23%** de la formation du troisième axe.

La représentation graphique de la contribution des variables à l'inertie des axes est donnée par le logiciel R® « **package corrplot** » en figure3.2.

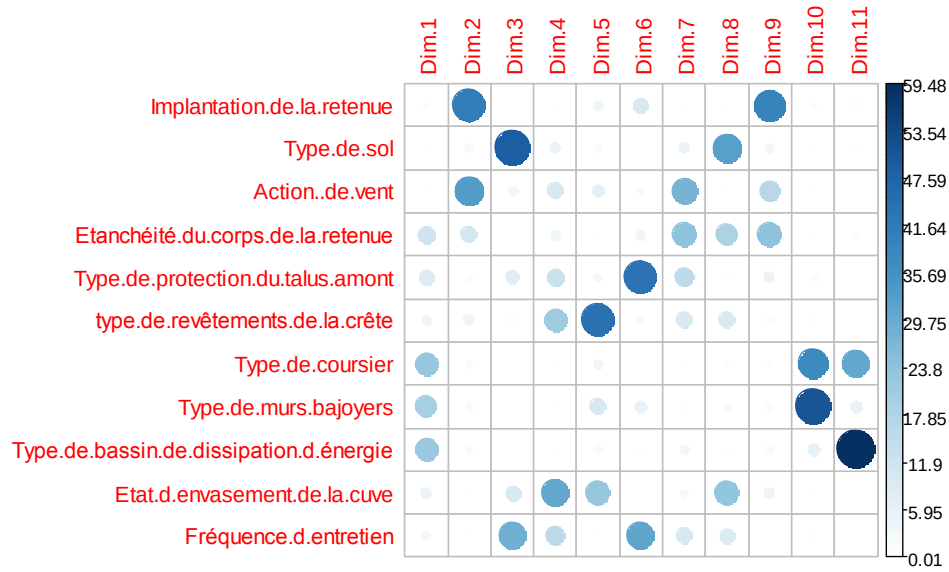


Figure 3.4 : Représentation graphique de la contribution des variables à l'inertie des axes.

3.6.1.3. Qualité de représentation des variables (cosinus carrés)

Pour interpréter correctement la proximité de projection d'une variable sur un plan, il faut s'assurer que cette variable soit bien représentée dans le plan. Pour cela, nous devons calculer le cosinus de cet angle, ou plutôt le carré du cosinus. Plus le carré du cosinus est grand, plus la variable sera proche de l'axe factoriel et donc sera bien représentée sur cet axe.

Le cosinus de l'angle entre l'axe factoriel et la variable n'est autre que la corrélation entre l'axe factoriel et la variable initiale. Plus une corrélation entre une variable et un axe est forte, plus la variable est proche de l'axe.

La qualité de représentation des variables est déterminée à partir du logiciel R®

Conformément à la relation (2.28). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.17

Tableau 3.17 : Qualité des représentations des variables (cos²)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Implantation de la retenue	0,06	0,73	0,01
Type de sol	0,00	0,04	0,72
Action du vent	0,00	0,58	0,05
Etanchéité du corps de la retenue	0,48	0,19	0,00
Type de protection du talus amont	0,33	0,03	0,11
type de revêtements de la crête	0,16	0,08	0,01
Type de coursier	0,89	0,03	0,00
Type de murs bajoyers	0,79	0,03	0,00
Type de bassin de dissipation d'énergie	0,88	0,04	0,00
Etat d'envasement de la cuve	0,19	0,00	0,14
Fréquence d'entretien	0,12	0,00	0,42

Rappelons que le seuil de corrélation $r_{\text{critique}} = 0.312$ donc au-delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Les variables «étanchéité du corps de la retenue, type de protection du talus amont de la retenue, type de coursier, type de murs bajoyers, type de bassin de dissipation d'énergie » sont proches du premier axe factoriel et sont bien représenté sur cet axe.

Les variables « implantation de la retenue et action du vent » sont proches du deuxième axe factoriel et sont bien représenté sur cet axe.

Les variables « type de sol et fréquence d'entretien » sont proches du troisième axe factoriel et sont bien représentées sur cet axe.

Toutefois, les variables « type de revêtements de la crête de la retenue et l'état d'envasement de la cuve » interviennent plus dans la formation des axes que nous avons éliminés.

Les représentations graphiques du $\cos^2$ des variables, données par le logiciel R® « **package corrplot** », est illustrée sur la figure 3.3.

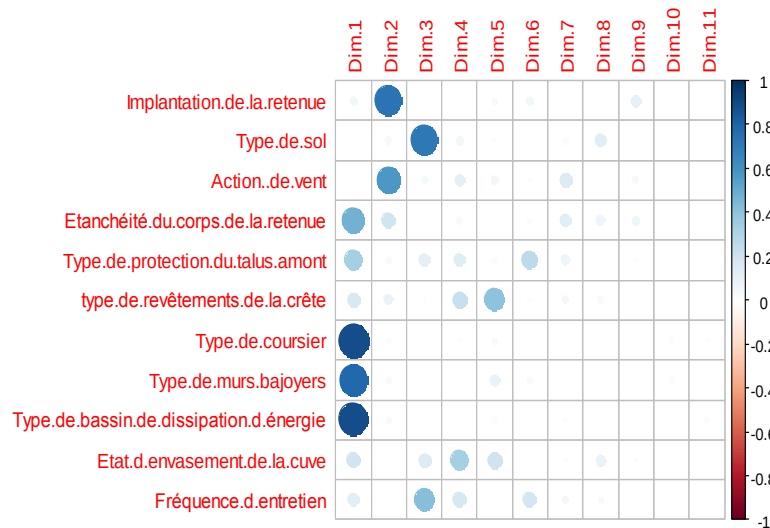


Figure 3.5 : Représentation graphique de la qualité de représentation des variables aux axes.

Pour le bon choix des axes principaux, il y a lieu de vérifier que les variables contribuant à la formation de ces derniers soient corrélées, dans notre cas, nous avons :

- **1^{er} axe Dim1**, nous avons des corrélations positive entre :
 - étanchéité du corps de la retenue et type de protection du talus amont de la retenue (*).
 - type de coursier et étanchéité du corps de la retenue (***).
 - type de coursier et type de murs bajoyers (***).
 - type de coursier et type de bassin de dissipation d'énergie (***).

- 2^{ème} axe Dim2, nous avons des corrélations négative entre :
 - implantation de la retenue et action du vent (**).
- 3^{ème} axe Dim3, nous avons des corrélations négative entre :
 - type de sol et fréquence d'entretien (*).

Ce qui confirme bien le bon choix de nos axes Dim1, Dim2 et Dim3. Par ailleurs, en visualisons le tableau 3.17, nous déduisons que les variables qui ont plus contribuées à la formation des axes Dim1, Dim2 et Dim3 respectivement sont type de coursier, implantation de la retenue, type de sol.

3.6.1.4. Cercles de corrélations

Les cercles de corrélation des variables dans les plans factoriels permettent de visualiser, parmi les variables initiales, les groupes de variables très corrélées entre elles. Les points-variables s'inscrivent dans un cercle de rayon 1(chapitre2) et sont d'autant plus proche du bord du cercle que le point variable est bien représenté par le plan factoriel, c'est-à-dire que la variable est bien corrélée avec les deux facteurs constituant ce plan.

Les variables qui ne sont pas situées au bord du cercle dans un plan factoriel ne sont pas corrélées avec les deux facteurs représentées. Elles ne servent pas à l'interprétation et l'effet de perspective empêche d'interpréter la proximité de deux variables (voir d'autres plans factoriels, où la corrélation sera plus forte).

Les variables qui ont le plus contribué à la formation des axes sont celles qui sont proches de l'axe et loin du centre de gravité.

Le cercle de corrélation montre les relations entre toutes les variables. Il peut être interprété comme suit :

- Les variables positivement corrélées sont regroupées. Ainsi, si les points sont très proches les variables forment un angle nul entre elle et sont très fortement corrélées.
- Les variables négativement corrélées sont positionnées sur les côtés opposés de l'origine du graphique (quadrants opposés). Ces variables forment entre elle un angle plat.
- Les variables qui font entre elle un angle droit ne sont pas corrélées.
- La distance entre les variables et l'origine mesure la qualité de représentation des variables. Les variables qui sont loin de l'origine sont bien représentées par l'ACP.

Les cercles de corrélation des variables, dans les plans des axes factoriels choisis et donnés par le logiciel R® sont illustrés dans les figures 3.6, 3.7 et 3.8.

a- Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-2)

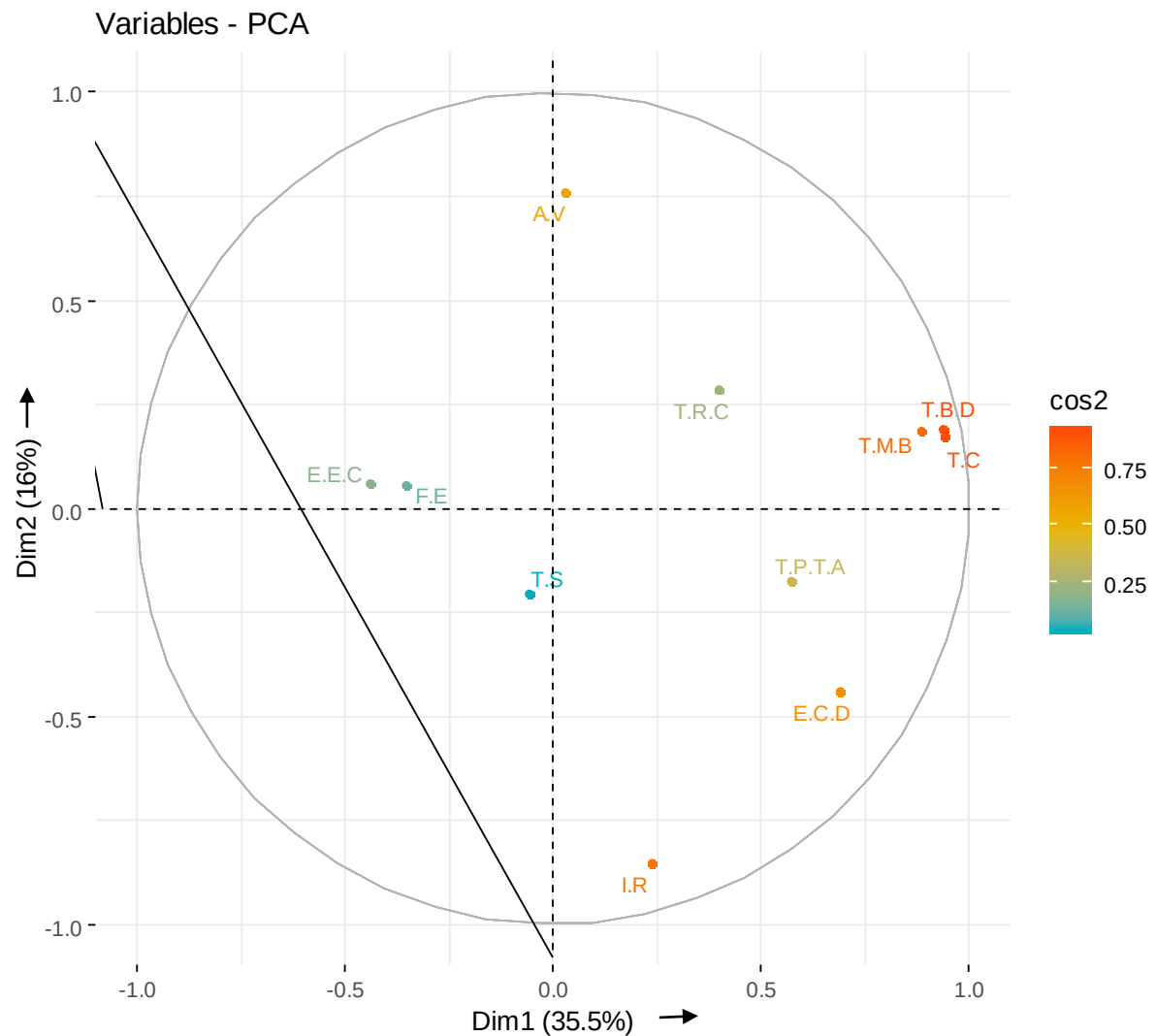


Figure 3.6 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-2).

Dans le plan factoriel (1-2), les variables qui sont bien représentées par ce plan (proches du cercle de corrélation) sont : type de coursier (T.C), type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D) , type de murs bajoyers (T.M.B) , implantation de la retenue (I.R) , étanchéité du corps de la retenue(E.C.D) , action du vent (A.V). Ces variables sont bien corrélées avec les deux facteurs constituant ce plan (tableau3.17).

Les variables qui ont les plus contribués à la formation de l'axe 1 sont : type de coursier (T.C), type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D), type de murs bajoyers (T.M.B), étanchéité du corps de la retenue (E.C.D) (tableau3.17).

Les variables qui ont les plus contribués à la formation de l'axe 2 sont : implantation de la retenue (I.R), action du vent (A.V) (tableau3.17).

Les variables qui sont proches entre elles donc corrélées positivement sont :

- type de murs bajoyers (T.M.B) et type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D)
- type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D) et type de coursier (T.C)
- type de murs bajoyers (T.M.B) et type de coursier (T.C).

b- Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-3)

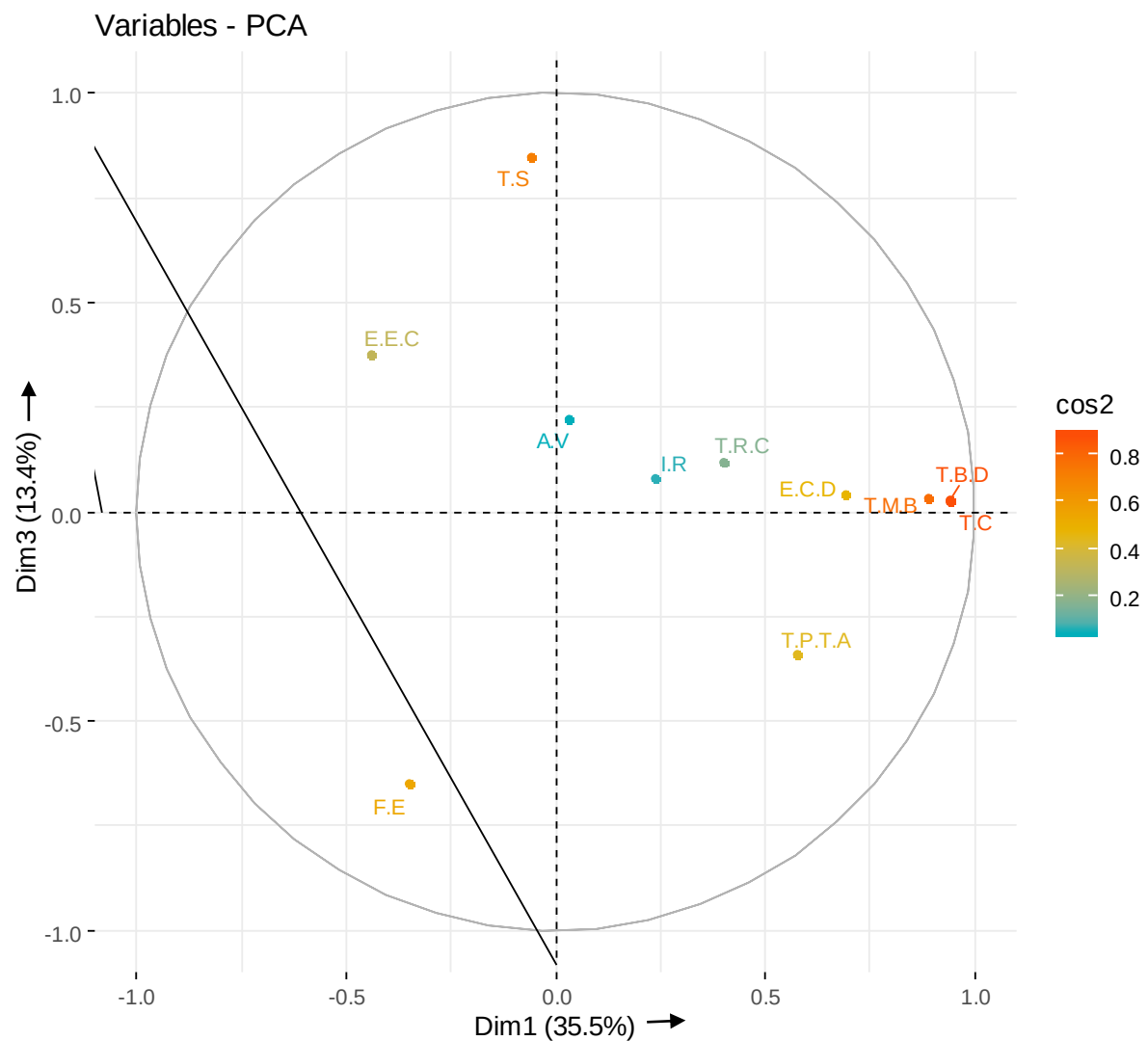


Figure 3.7 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-3)

Dans le plan factoriel (1-3), les variables qui sont bien représentées par ce plan (proches du cercle de corrélation) sont : type de coursier (T.C), type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D), type de murs bajoyers (T.M.B), type de sol (T.S) et Fréquence d'entretien (F.E), ce

qui veut dire que ces variables sont bien corrélées avec les deux facteurs constituant ce plan (tableau3.17).

Les variables qui sont proches entre elles sont corrélées positivement sont :

- type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D) et type de coursier (T.C)
- type de murs bajoyers (T.M.B) et type de coursier (T.C)
- type de murs bajoyers (T.M.B) et type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D).

Les variables qui ont le plus contribué à la formation des axes sont celles qui sont proches de l'axe et loin du centre de gravité.

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 1 sont : type de coursier (T.C), type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D) et type de murs bajoyers (T.M.B) (tableau3.17).

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 2 sont : type de sol (T.S) et fréquence d'entretien (F.E) (tableau3.17).

c- Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (2-3)

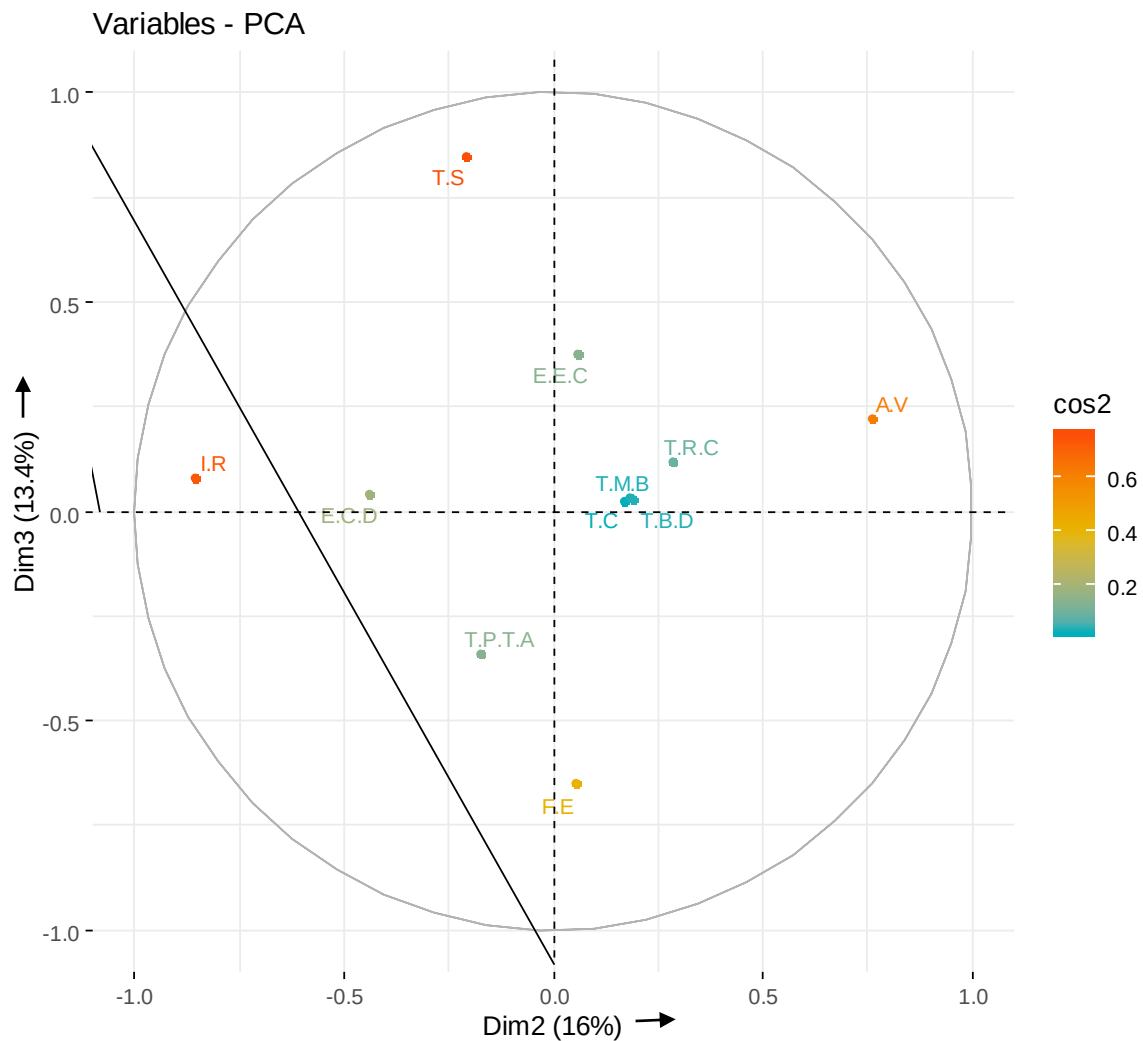


Figure 3.8: Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (2-3)

Dans le plan factoriel (2-3), les variables qui sont bien représentées par ce plan (proches du cercle de corrélation) sont : type de sol (T.S), action de vent (A.V), implantation de la retenue (I.R) et fréquence d'entretien (F.E), ce qui veut dire que ces variables sont bien corrélées avec les deux facteurs constituant ce plan (tableau 3.17).

Les variables qui sont corrélées négativement sont :

- type de sol (T.S) et fréquence d'entretien (F.E)
- action de vent (A.V) et implantation de la retenue (I.R).

Les variables qui ont le plus contribué à la formation des axes sont celles qui sont proches de l'axe et loin du centre de gravité.

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 1 sont : type de coursier (T.C), type de bassin de dissipation d'énergie (T.B.D) et type de murs bajoyers (T.M.B) (tableau3.17).

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 2 sont : type de sol (T.S) et fréquence d'entretien (F.E) (tableau3.17).

3.6.2. Etude des individus

3.6.2.1. Cordonnées factorielles des individus

Les coordonnées factorielles des individus sont obtenues par une projection orthogonale de l'individu sur l'axe factoriel. Le repérage des individus contribuant à la formation d'un axe est effectué par les valeurs des coordonnées **le plus élevé en valeur absolue**.

Les coefficients de ces coordonnées factorielles sont fournis par le logiciel R®. Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.18.

Tableau 3.18 : Coordonnées factorielles des individus.

Site de la retenue	N°	Dim.1	Dim.2	Dim.3
A.Guehrene N°270	1	-1,69	-0,13	1,56
Ait Toudert N°169	2	-1,09	0,34	2,92
Ait Toudert N°170	3	-1,83	-0,44	1,32
Ait Toudert N°171	4	0,98	2,01	1,88
Ait Toudert N°172	5	-1,45	0,71	0,97
Azeffoun N° 10	6	0,16	-3,62	1,17
Azeffoun N° 11	7	-0,09	-2,46	0,69
Azeffoun N° 12	8	0,06	-2,13	1,22
Azeffoun N° 14	9	0,54	-2,63	1,09
Azeffoun N° 15	10	0,70	-3,25	-0,71
Bouzeguene N°2	11	-0,33	1,01	0,40
Bouzeguene N°3	12	-0,38	1,56	0,46
Draa Ben Khedda N°415	13	-0,68	1,60	1,54
Draa El Mizan N° 260	14	-2,71	0,02	-0,66
Freha N°389	15	-0,26	1,18	-0,27
Freha N°395	16	-0,55	-0,80	-0,25

Freha N°396	17	4,84	0,38	-0,09
Freha N°397	18	-1,09	0,81	0,01
Freha N°398	19	2,97	1,13	0,82
Iloula Oumalou N° 399	20	-0,37	1,49	0,42
Iloula Oumalou N° 1	21	-0,18	1,51	-1,01
Mekla N° 367	22	-0,21	-0,53	-1,05
Mekla N°368	23	-0,31	-1,18	-0,09
Mekla N° 391	24	4,69	-0,67	-1,26
Mekla N°393	25	-1,80	-0,92	-0,68
MEKLA (Chaoufa) N°394	26	2,42	0,26	0,44
Ouaguenoun 360	27	4,35	0,57	0,62
Sidi Naamane N°421	28	-2,62	0,57	0,83
Sidi Naamane N°428	29	-1,08	1,28	-3,48
Souamaa N°2	30	-0,85	-0,32	-1,71
Timizart N°201	31	2,98	0,72	-0,70
Timizart N°363	32	-1,42	-0,07	0,07
Timizart N°366	33	-2,07	-0,17	-0,91
Timizart N°388	34	-0,24	-0,43	-2,43
Timizart N°360	35	4,45	0,56	0,02
Timizart N°200	36	-0,06	-0,60	-1,57
Tirmitine N°401	37	-1,01	1,21	-0,04
Tirmitine N°402	38	-1,28	0,04	-1,46
Tirmitine N°412	39	-1,77	0,18	-0,35
Tizi N'tlata N°300	40	-1,72	1,24	0,28

Après analyse des résultats, il ressort que les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 1 sont : 1, 3, 5, 14, 17, 18, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 35, 39 et 40.

Les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 2 sont : 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 20, 21, 23 et 37

Les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 3 sont : 2, 22, 29, 30, 34, 36 et 38.

3.6.2.2. Contribution relative des individus à l'inertie des axes

La contribution relative des individus à l'inertie des axes est donnée par le logiciel R®. Les résultats sont illustrés dans le tableau 3.19.

Tableau 3.19 : Contribution relatives des individus à l'inertie des axes

Site de la retenue	N°	Dim.1	Dim.2	Dim.3
A.Guehrene N°270	1	1,83	0,02	4,15
Ait Toudert N°169	2	0,76	0,16	14,49
Ait Toudert N°170	3	2,15	0,28	2,97
Ait Toudert N°171	4	0,61	5,73	5,98
Ait Toudert N°172	5	1,35	0,71	1,60
Azeffoun N° 10	6	0,02	18,58	2,34
Azeffoun N° 11	7	0,01	8,60	0,80

Azeffoun N° 12	8	0,00	6,43	2,52
Azeffoun N° 14	9	0,19	9,84	2,03
Azeffoun N° 15	10	0,31	14,95	0,87
Bouzeguene N°2	11	0,07	1,45	0,27
Bouzeguene N°3	12	0,09	3,43	0,36
Draa Ben Khedda N°415	13	0,30	3,63	4,00
Draa El Mizan N°260	14	4,69	0,00	0,74
Freha N°389	15	0,04	1,96	0,12
Freha N°395	16	0,19	0,92	0,10
Freha N°396	17	15,02	0,20	0,01
Freha N°397	18	0,76	0,93	0,00
Freha N°398	19	5,64	1,83	1,14
Iloula Oumalou N° 399	20	0,09	3,15	0,30
Iloula Oumalou N° 1	21	0,02	3,22	1,75
Mekla N° 367	22	0,03	0,40	1,87
Mekla N°368	23	0,06	1,98	0,01
Mekla N° 391	24	14,11	0,63	2,69
Mekla N°393	25	2,09	1,21	0,79
MEKLA (Chaoufa) N°394	26	3,75	0,10	0,32
Ouaguenoun 360	27	12,13	0,46	0,65
Sidi Naamane N°421	28	4,41	0,45	1,16
Sidi Naamane N°428	29	0,75	2,32	20,59
Souamaa N°2	30	0,46	0,15	4,95
Timizart N°201	31	5,70	0,73	0,83
Timizart N°363	32	1,29	0,01	0,01
Timizart N°366	33	2,74	0,04	1,40
Timizart N°388	34	0,04	0,26	10,05
Timizart N°360	35	12,68	0,44	0,00
Timizart N°200	36	0,00	0,51	4,16
Tirmitine N°401	37	0,66	2,07	0,00
Tirmitine N°402	38	1,04	0,00	3,63
Tirmitine N°412	39	2,01	0,04	0,21
Tizi N'tlata N°300	40	1,89	2,19	0,13

Les treize individus 14, 17, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 35 et 39 expliquent à eux seuls **86.27%** de la formation du premier axe.

Les quinze individus 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 20, 21, 23, 37 et 40 expliquent à eux seuls **82.39%** de la formation du deuxième axe.

Les onze individus 1, 2, 3, 4, 5, 22, 29, 30, 34, 36 et 38 expliquent à eux seuls **74.43%** de la formation du troisième axe.

3.6.2.3. Qualité des représentations des individus (cosinus carrés)

Pour interpréter correctement la proximité de projection d'un individu sur un plan, il faut s'assurer que cet individu soit bien représenté dans le plan. Pour cela, nous devons calculer

le cosinus de cet angle, ou plutôt le carré du cosinus. Plus le cosinus est grand, plus l'individu sera proche de l'axe factoriel et donc sera bien représenté sur cet axe.

Le cosinus de l'angle entre l'axe factoriel et l'individu n'est autre que la corrélation entre l'axe factoriel et l'individu initial indiquant la qualité de représentation de l'individu sur l'axe. Les coordonnées des individus sont égales aux corrélations avec les axes. La qualité de représentation des individus est déterminée à partir du logiciel R[®] conformément à la relation (2.28). Les résultats sont illustrés sur le tableau 3.20.

Tableau 3.20 : Qualité des représentations des individus ($\cos^2$)

Site de la retenue	N°	Dim.1	Dim.2	Dim.3
A. Guehrene N°270	1	0,38	0,00	0,32
Ait Toudert N°169	2	0,10	0,01	0,69
Ait Toudert N°170	3	0,37	0,02	0,19
Ait Toudert N°171	4	0,06	0,25	0,22
Ait Toudert N°172	5	0,41	0,10	0,18
Azeffoun N° 10	6	0,00	0,82	0,09
Azeffoun N° 11	7	0,00	0,68	0,05
Azeffoun N° 12	8	0,00	0,53	0,17
Azeffoun N° 14	9	0,03	0,68	0,12
Azeffoun N° 15	10	0,03	0,62	0,03
Bouzeguene N°2	11	0,02	0,15	0,02
Bouzeguene N°3	12	0,02	0,42	0,04
Draa Ben Khedda N°415	13	0,07	0,41	0,38
Draa El Mizan N°260	14	0,50	0,00	0,03
Freha N°389	15	0,01	0,22	0,01
Freha N°395	16	0,06	0,13	0,01
Freha N°396	17	0,94	0,01	0,00
Freha N°397	18	0,25	0,14	0,00
Freha N°398	19	0,75	0,11	0,06
Iloula Oumalou N° 399	20	0,03	0,41	0,03
Iloula Oumalou N° 1	21	0,00	0,30	0,14
Mekla N° 367	22	0,01	0,07	0,30
Mekla N°368	23	0,02	0,26	0,00
Mekla N° 391	24	0,57	0,01	0,04
Mekla N°393	25	0,51	0,13	0,07
MEKLA (Chaoufa) N°394	26	0,56	0,01	0,02
Ouaguenoun 360	27	0,90	0,02	0,02
Sidi Naamane N°421	28	0,39	0,02	0,04
Sidi Naamane N°428	29	0,06	0,08	0,59
Souamaa N°2	30	0,13	0,02	0,54
Timizart N°201	31	0,63	0,04	0,03
Timizart N°363	32	0,61	0,00	0,00
Timizart N°366	33	0,58	0,00	0,11
Timizart N°388	34	0,00	0,01	0,44
Timizart N°360	35	0,91	0,01	0,00
Timizart N°200	36	0,00	0,06	0,41
Tirmitine N°401	37	0,35	0,49	0,00
Tirmitine N°402	38	0,24	0,00	0,32

Tirmitine N°412	39	0,76	0,01	0,03
Tizi N'tlata N°300	40	0.14	0.07	0,00

$r_{\text{critique}} = 0.312$. Au-delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Les individus 1, 3, 5, 14, 17, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 31, 32, 33, 37 et 39 sont proches du premier axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

Les individus 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 20 et 35 sont proches du deuxième axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

Les individus 2, 29, 30, 34, 36 et 38 sont proches du troisième axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

3.6.2.4. Projection des individus dans les plans factoriels

La projection des individus dans les plans factoriels permettra d'identifier les individus qui ont contribué à la formation des axes. Lorsque des points de projections des individus sont éloignés des axes (ou d'un plan), nous pouvons nous assurer que les points représentant ces individus sont éloignés dans l'espace. Puisque tous les individus ont le même poids, un individu contribuera d'autant plus à la confection d'un axe que sa projection sur cet axe sera éloignée du centre de gravité du nuage. Inversement, un individu dont la projection sur un axe sera proche du centre de gravité contribuera faiblement à l'inertie portée par cet axe.

Les individus sont projetés dans les plans factoriels 1-2 (figure 3.6) et 1-3 (figure 3.7).

a - Plan factoriel (1-2)

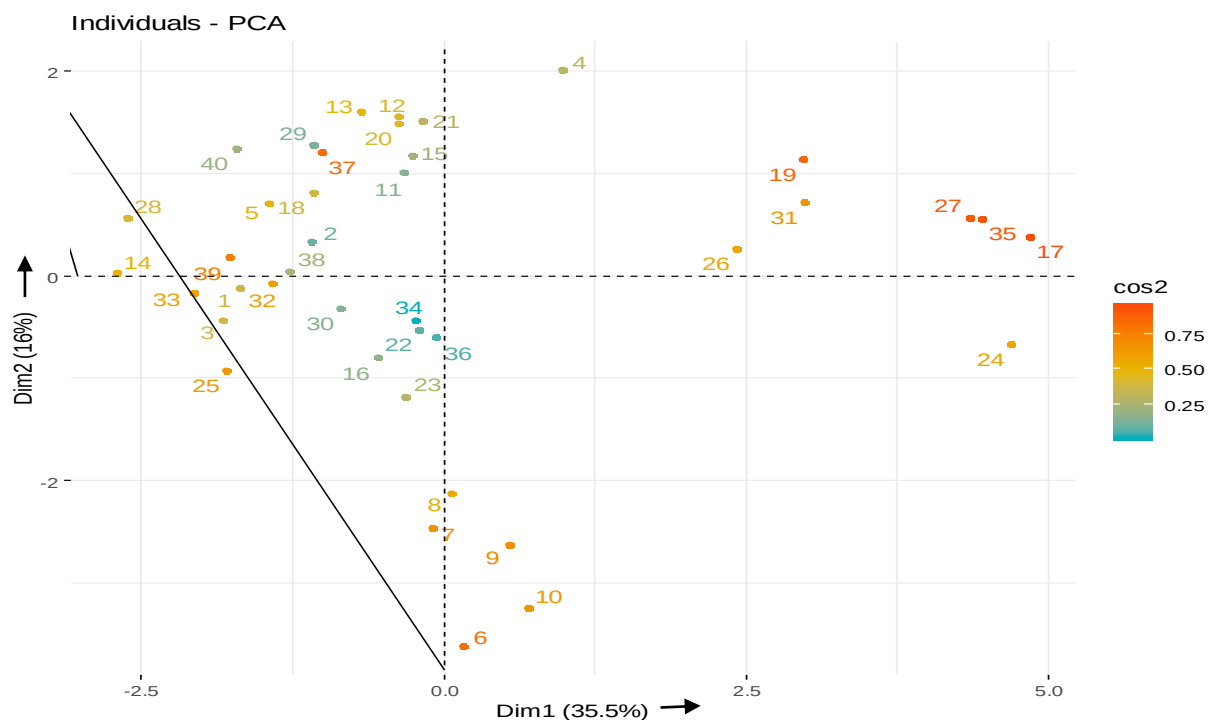


Figure 3.9 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1-2).

Les individus qui sont bien représentés dans le plan factoriel (1-2) sont loin du centre de gravité. Nous distinguons les individus auxquels sont affectés les numéros suivants dans le tableau 3.1. 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 33, 35, 37, 39 et 40 ce qui veut dire que ces individus sont éloignés dans l'espace et bien dispersés.

b - Plan factoriel (1-3)

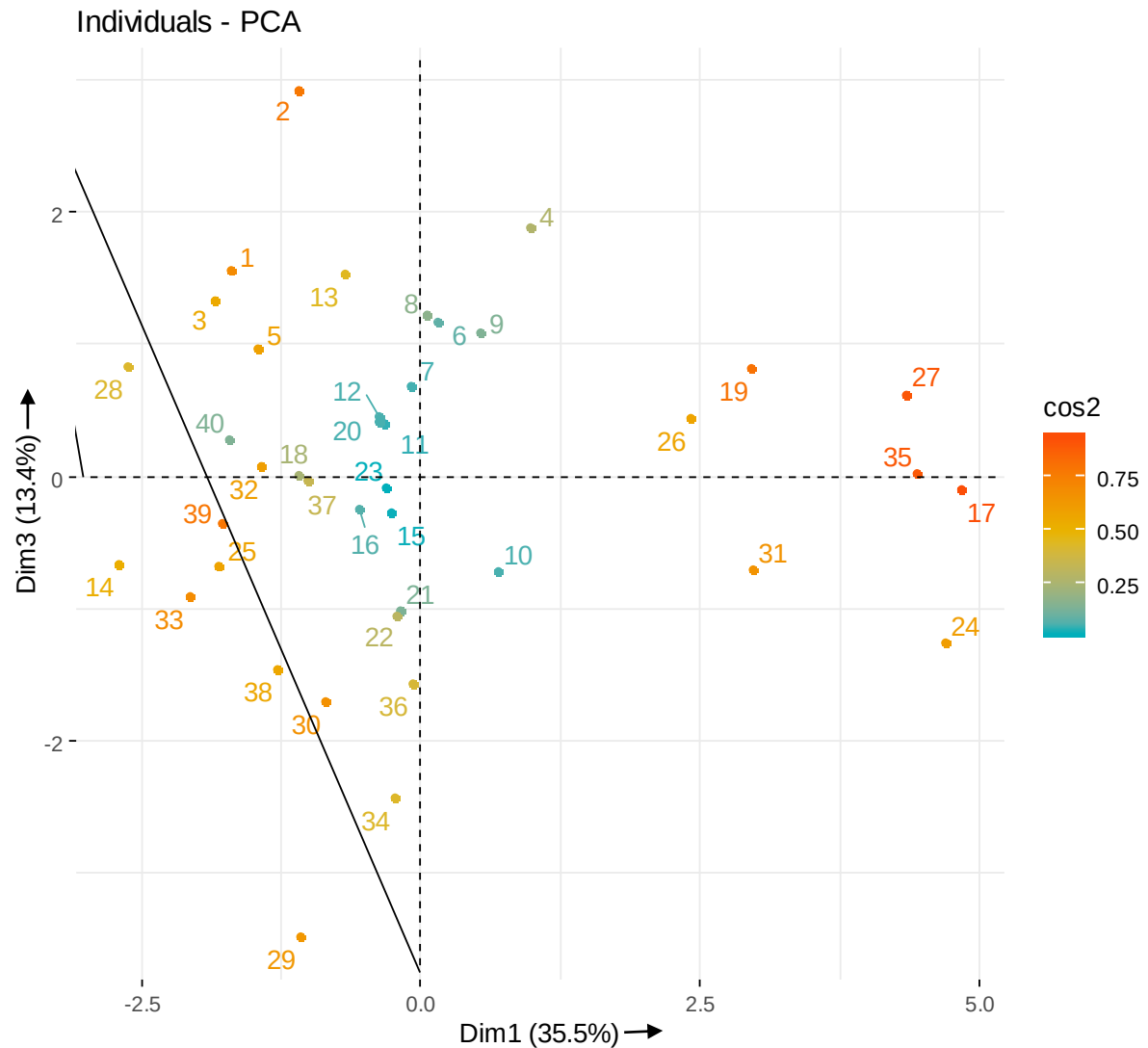


Figure 3.10 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1-3).

Les individus qui sont bien représentés dans le plan factoriel (1-3) sont loin du centre de gravité. Nous distinguons les individus auxquels sont affectés les numéros suivants dans le tableau 3.1. 1, 2, 3, 14, 17, 19, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 38 et 39 ce qui veut dire que ces individus sont éloignés dans l'espace et bien dispersés.

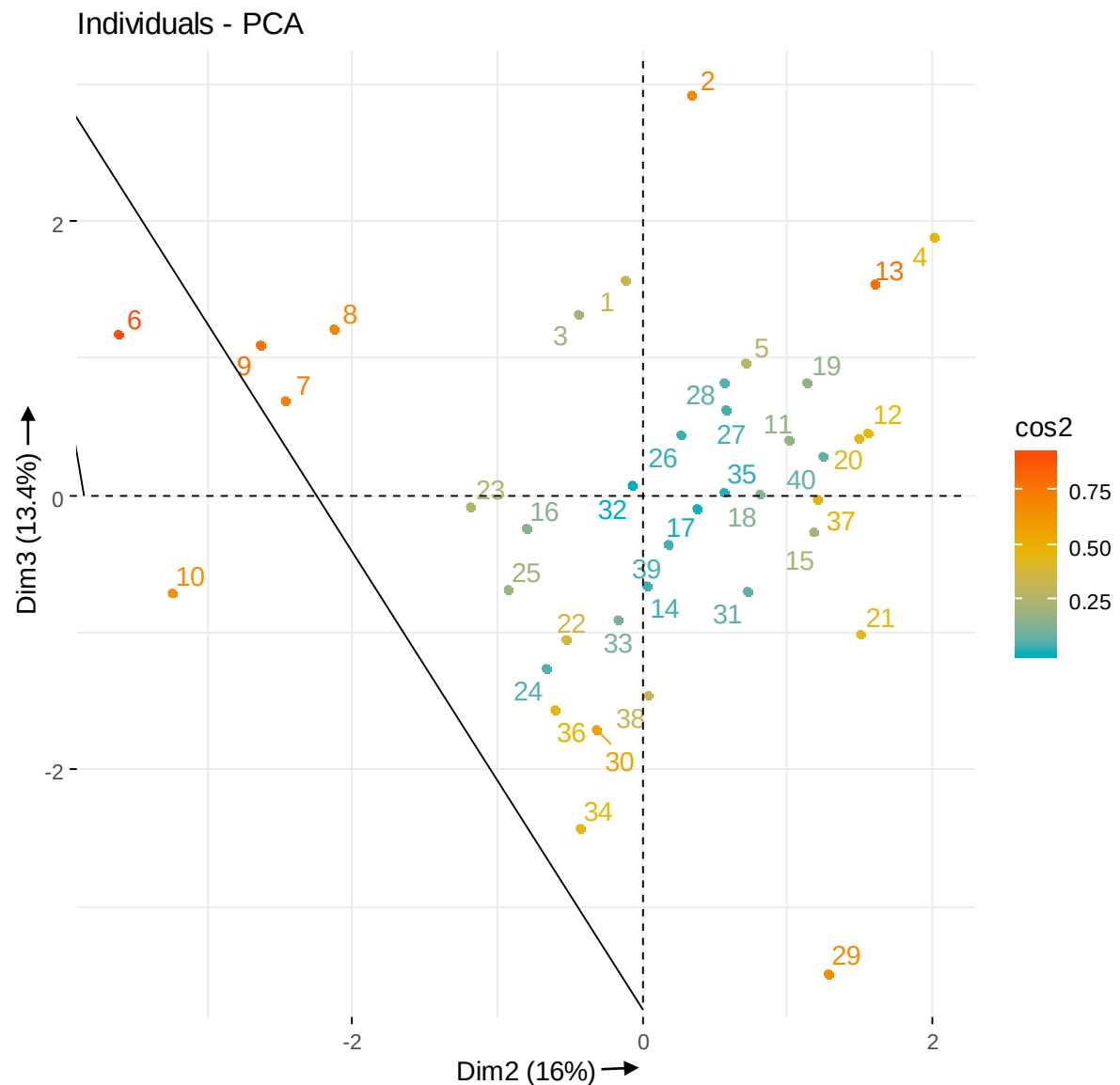
c - Plan factoriel (2-3)

Figure 3.11 : Représentation des individus dans le plan factoriel (2-3).

Les individus qui sont bien représentés dans le plan factoriel (2-3) sont loin du centre de gravité. Nous distinguons les individus auxquels sont affectés les numéros suivants dans le tableau 3.1. 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 20, 21, 29, 30, 34, 36, 37 et 38 ce qui veut dire que ces individus sont éloignés dans l'espace et bien dispersés.

3.6.3. Lien entre les variables et les individus

L'examen des graphiques (variables, individus) permettra d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables (figures 3.9, 3.10 et 3.11). Pour la construction des groupes d'individus nous nous basons sur la qualité de représentation des individus (tableau 3.20) et la qualité de représentation des variables (tableau 3.17). Cette

qualité de représentation représente des corrélations des individus et des variables avec les axes. Rappelons que les corrélations significatives sont supérieures à $r_{\text{critique}} = 0.312$.

Un plan factoriel est défini par deux axes, ce qui nous donne quatre groupes : 2 groupes par axe (un groupe définissant les individus dont les coordonnées sur l'axe sont négatives et un groupe définissant les individus dont les coordonnées sur l'axe sont positives).

a- Projection des individus et variables dans le plan factoriel (1- 2)

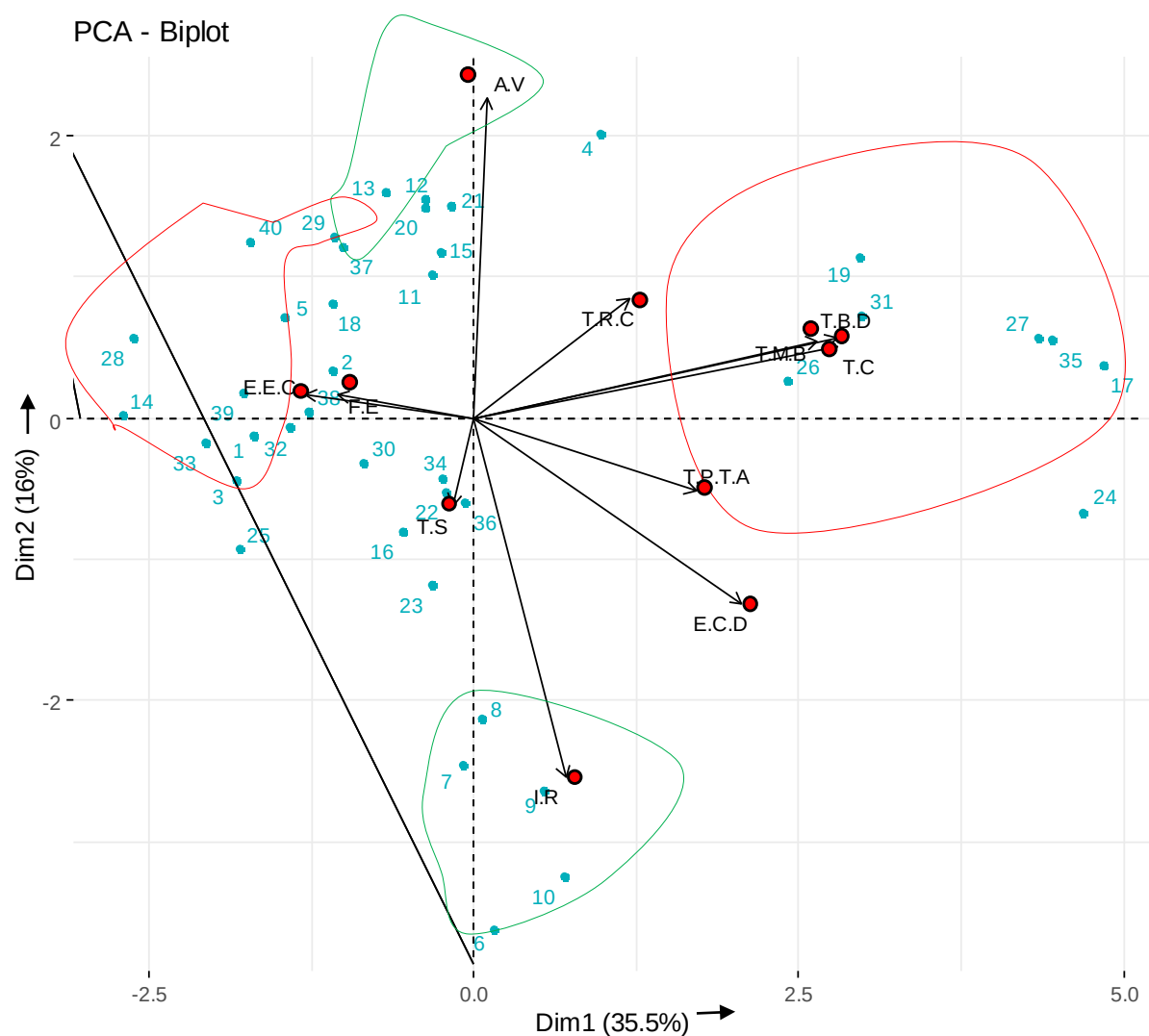


Figure 3.12: Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1-2)

- L'axe 1 (couleur rouge)

Le premier groupe rassemble les individus dont les coordonnées sur l'axe 1 sont positives et ayant contribué à la formation de cet axe (tableau 3.20). Ces individus sont : 17, 19, 24, 26,

27, 31 et 35. Ce groupe rassemble aussi les variables qui ont contribué à la formation de cet axe1 (tableau3.17), soient « étanchéité du corps de la retenue (E.C.D), type de protection du talus amont de la retenue (T.P.A), type de coursier (T.C), type de murs bajoyers (T.M.B) , type de bassin de dissipation d'énergie) (T.B.D ». De ce fait, nous déduisons que ce sont les individus de ce groupe qui ont contribué à la corrélation des variables de ce groupe.

Le deuxième groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 1 sont négatives contient les individus suivants : 1, 3, 5,14, 25, 28, 32, 33,37 et 39. Les individus de ce groupe n'ont pas contribué aux corrélations des variables.

Nous notons que pour un même axe, les individus qui ont contribué aux corrélations fortes des variables (du même groupe) ont de fortes notations partielles pour ces variables. A l'inverse, les autres individus ont de faibles notations pour ces variables (tableau 3.21).

Tableau 3.21 : contribution des variables à la formation de l'axe 1.

	Etanchéité du corps de la retenue	Type de protection du talus amont de la retenue	Type de coursier	Type de murs bajoyers	Type de bassin de dissipation d'énergie
SIDI NAAMANE N°421 (n = 28)	1	2	2	2	1
TIMIZART N°360 (n = 35)	3	4	16	16	16

- L'axe 2 (couleur verte)

Par procédé analogue au premier axe, nous définissons deux groupes d'individus pour les deuxièmes axes. Le premier groupe rassemble les individus 12, 13, 20 et 37 et la variable « action du vent (A.V) »

Dans le deuxième groupe, on retrouve les individus 6, 7, 8, 9 et 10 et la variable « implantation de la retenue (I.R).

La projection de individus et des variables dans le plan factoriel (1-3) représenté par la figure (3.9) et dans le plan (2-3) illustré par la figure 3.10 conduit aux mêmes résultats et interprétations. Toutes fois, il ya lieu de noter qu'un individu peut contribuer à la formation de deux axes, comme le cas de l'individu 1 (retenue A.Guehrene) et l'individu 13 (retenue Draa ben Khedda) (tableau 3.20). Ces individus appartiennent à deux groupes.

b- Projection des individus et variables dans le plan factoriel (1- 3)

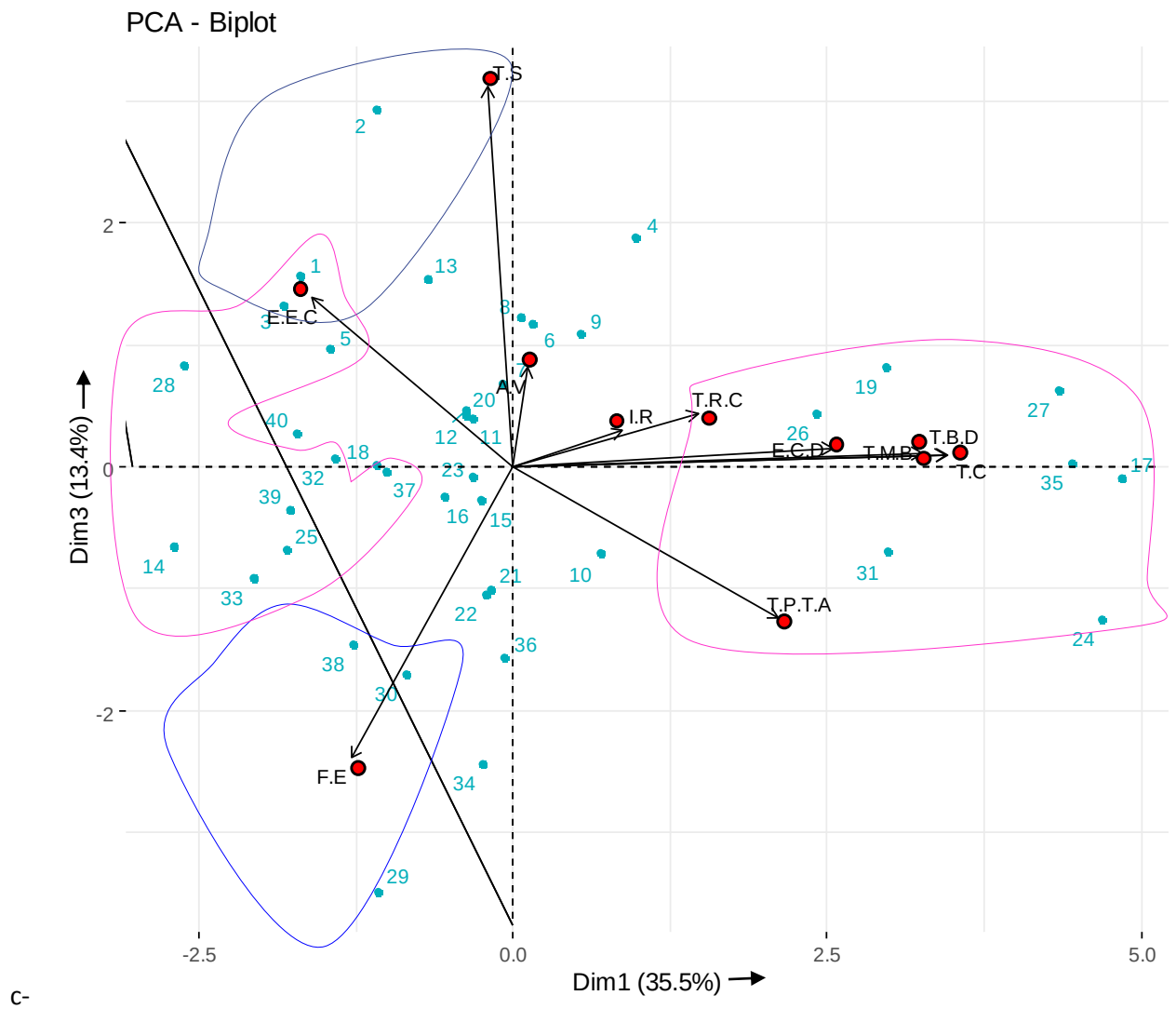


Figure 3.13: Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1-3)

d- Projection des individus et variables dans le plan factoriel (2- 3)

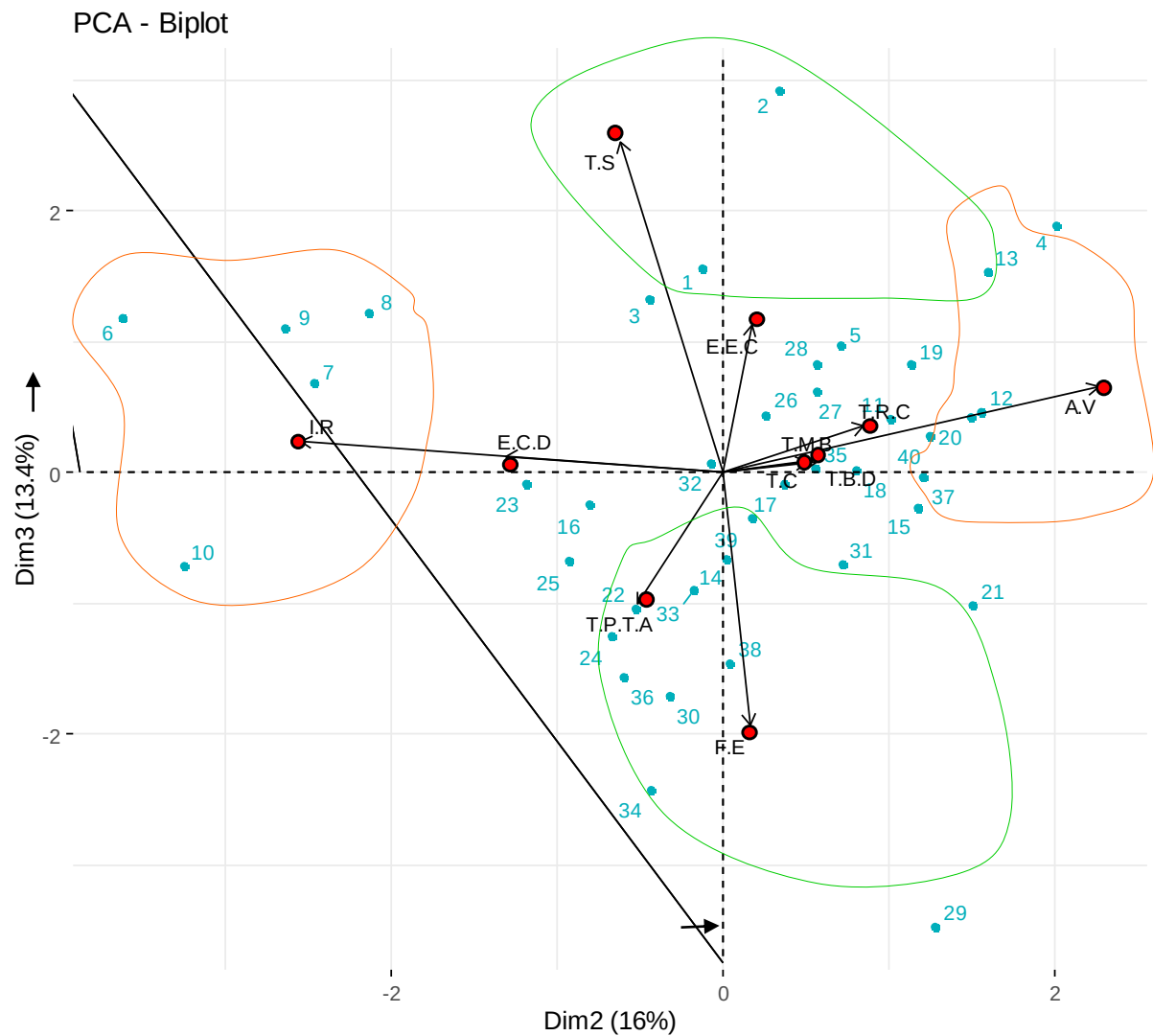


Figure 3.14 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (2-3)

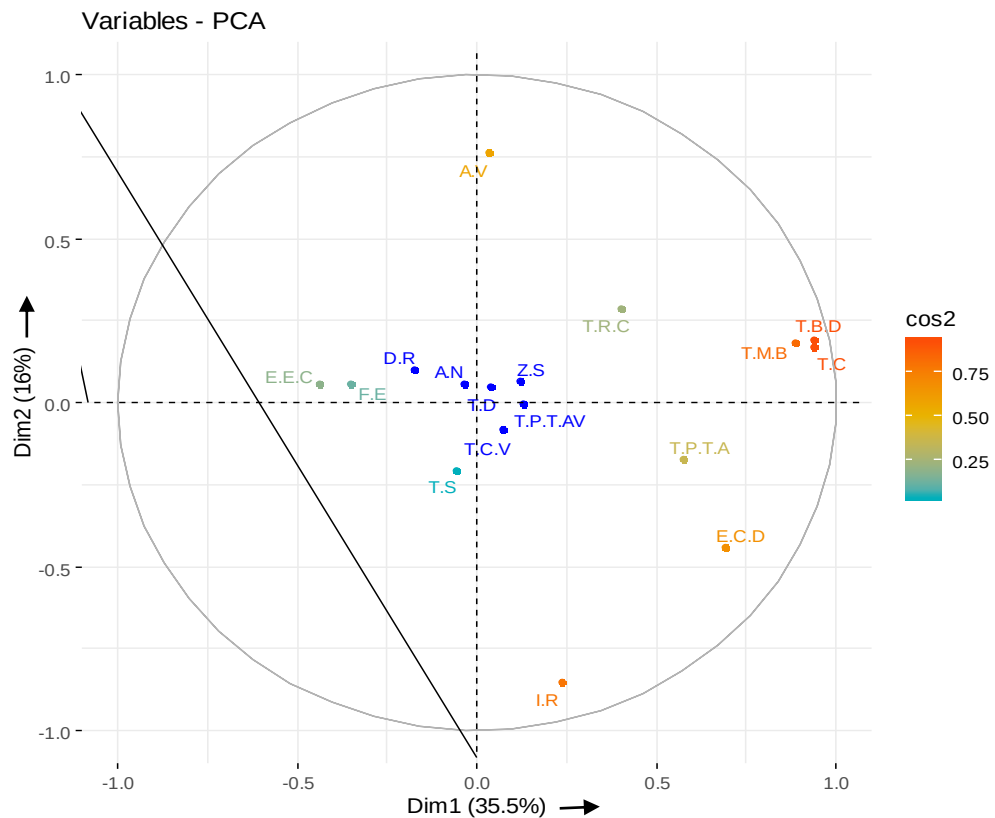
Remarque

Les individus appartenant aux différents groupes constitués sont ceux qui ont participé à la présence de corrélations significatives entre les variables de la même groupe, comme illustré dans la matrice de corrélation (tableau 3.12). Nous pouvons alors dire que les individus se trouvant dans un même groupe se ressemblent du point de vue de ces variables.

3.7. Variables supplémentaires

On appelle variables supplémentaires les variables qui ne présente aucune corrélation, et qui ont été retranché dans le tableau final de l'ACP. Afin de comprendre comment ces variables sont liées aux autres variables ayant fait l'objet d'un ACP, nous les faisons apparaître dans la représentation graphique des cercles de corrélation en les introduisant comme variables supplémentaires. La représentation de ces variables supplémentaires dans les plans factoriels (1-2 et 1-3), sont illustrés dans les figures (3.10 et 3.11 et 3.12). Après analyse des résultats, nous remarquons que les variables supplémentaires sont représentées par le logiciel R® avec une couleur (bleu) qui ne figure pas dans la palette e la légende, à savoir : destination de la retenue (D.R) , action de neige (A.N) , type de déversoir (T.D), zone sismique (Z.S), type de protection du talus aval de la retenue (T.P.AV) et type de conduite de vidange (T.C.V). Ces variables sont proches du centre du cercle et loin de la périphérie. Ce qui confirme que ces variables ne présentent aucune corrélation. Nous concluons que ces variables sont les plus prépondérantes dans le calcul de l'indice Iv, ceci étant confirmé par valeurs importantes de leurs notes partielles.

a- Représentation graphique des variables supplémentaires dans le plan factoriel (1-2)



b-

Figure 3.15 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (1-2).

b-Représentation graphique des variables supplémentaire dans le plan factoriel (1 - 3)

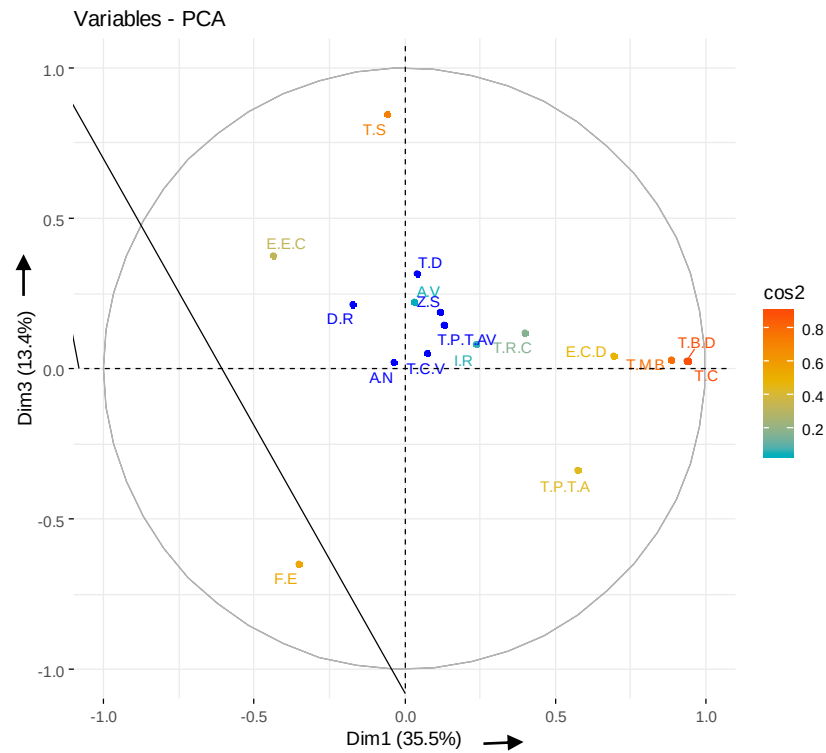


Figure 3.16 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (1-3).

c-Représentation graphique des variables supplémentaire dans le plan factoriel (2 - 3)

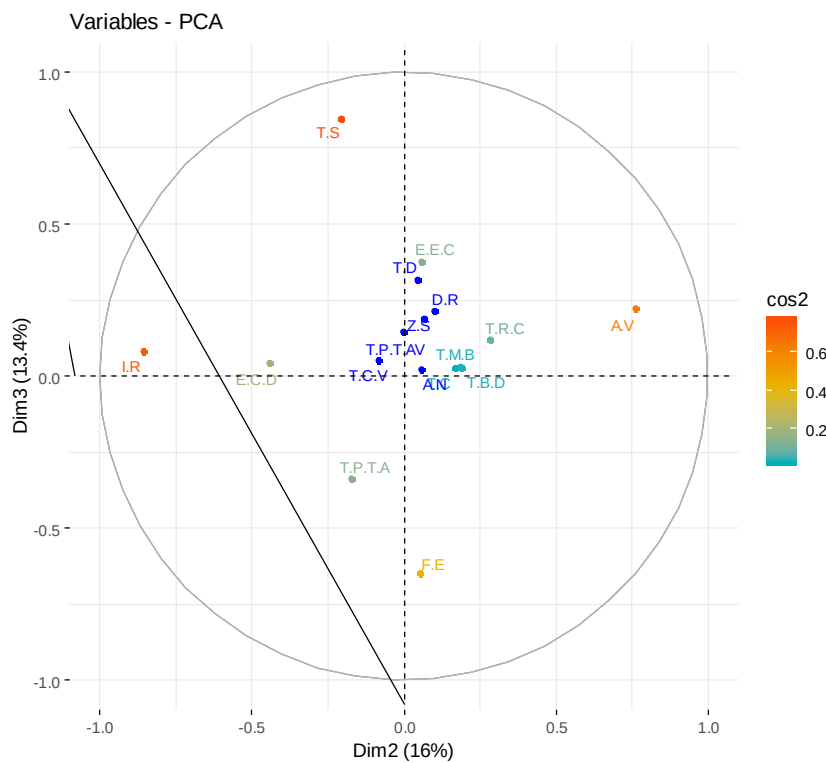


Figure 3.17 : La représentation des variables supplémentaires dans le plan factoriel (2-3).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode d'analyse en composante principale (ACP), pour analyser les 17 paramètres pris en considération dans le calcul de l'indice de vulnérabilité « Iv ». La méthode a été appliquée avec succès à l'échelle d'un parc de 40 retenues collinaires. Comme nous l'avons montré déjà, il ne suffit pas d'avoir un tableau croisant des variables quantitatives et des individus pour appliquer une ACP, encore faut-il que ce tableau vérifie la présence d'un lien entre les variables par la présence de corrélation significatives, qui nous permettra d'extraire les composantes principales, aussi, il y'a lieu de vérifier deux tests : le test de **sphéricité de Bartlett** (risque d'erreur) et la **non singularité de la matrice de corrélation**. Le seuil minimal du risque d'erreur $r_{critique}$, obtenu dans notre cas, est égal à 0.312, ce qui signifie qu'au-delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives.

Le choix des axes principaux est effectué en se basant sur deux critères, le critère de Kaiser, qui consiste à ne retenir que les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1, puis le critère du **coude de Cattell**, qui consiste à rechercher le pont de cassure qui représente le nombre de facteurs au-delà duquel l'information ajoutée est peu pertinente, nous avons retenu trois axes principaux Comp1, Comp2, Comp3. Ces axes présentent **64.88%** de l'inertie totale (l'information initiale), le reste de l'information est porté par les autres axes non retenus.

Les résultats obtenus montrent que les variables ayant contribué à la formation des trois axes principaux comp1, comp2 et comp3 sont corrélées, ce qui confirme le bon choix de ces axes. La qualité de représentation des individus est déterminée de la même manière, à partir d'un seuil minimal $r_{critique} = 0.312$. Au-delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Plus l'individu est proche de l'axe plus sa représentation sera précise sur cet axe, l'examen des graphiques des variable individus a permis d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables, c'est-à-dire que les individus appartenant aux différents groupes constitués sont ceux qui ont participé à la présence de corrélations significatives entre les différentes variables comme illustré dans la matrice de corrélation (tableau 3.12). Donc, nous pouvons conclure que les individus se trouvant dans un même groupe se rassemblent du point de vu de ces variables. Nous pouvons décomposer le parc étudié en trois ensembles composés chacun groupe d'individus (retenues collinaires) semblables comme suit :

Ensemble 1 : les retenues collinaires : A.Guehrene N°270, Ait Toudert N°170, Ait Toudert N°172, Draa El Mizan N°260, Draa El Mizan N°260, Freha N°396, Freha N°398, Mekla N°391, Mekla N°393, MEKLA (Chaoufa) N°394, Ouaguenoun 360, Sidi Naamane N°421, Timizart N°201, Timizart N°363, Timizart N°366, Timizart N°360, Tirmitine N°401 et

Tirmitine N°412. Ces retenues se rassemblent du point de vu des variables « étanchéité du corps de la retenue, type de protection du talus amont de la retenue, type de coursier, type de murs bajoyers et type de bassin de dissipation d'énergie », puisqu'elles ont contribué à leurs corrélations.

Ensemble 2 : Les retenues collinaires : Azeffoun N° 10, Azeffoun N° 11, Azeffoun N° 12, Azeffoun N° 14, Azeffoun N° 15, Bouzeguene N°3, Draa Ben Khedda N°415, Iloula Oumalou N° 399 et Tirmitine N°401 se rassemblent du point de vu des variables «implantations de la retenue et action de vent », puisqu'elles ont contribué à leur corrélation.

Ensemble 3 : Les retenues collinaires : A.Guehrene N°270, Ait Toudert N°169, Draa Ben Khedda N°415, Sidi Naamane N°428, Souamaa N°2, Timizart N°388, Timizart N°200 et Timizart N°402 se ressemblent du point de vu des variables « type de sol et fréquence d'entretien », puisqu'elles ont contribué à leur corrélation.

Conclusion générale

Prédire la durée de vie résiduelle d'une retenue collinaire donnée est la principale demande des gestionnaires. Cette prévision dépend de l'état de la retenue souvent difficile à cerner et de la cinétique du vieillissement. Le concept de vulnérabilité à certains aléas naturels (neige, vent, séisme ... etc.) est utilisé dans cette étude, pour définir l'état de dégradation des retenues collinaires en faisant intervenir 17 paramètres influents, pour trois types d'analyses (environnementale, structurelle et fonctionnelle).

Cette méthodologie d'indice a été testée avec succès à l'échelle d'un parc de 40 retenues collinaires expertisées dans différentes daïra (Ouacif, Ouadhias, Draa El Mizan et Draa Ben Khedda Bouzeguene, Ouaguenoun, Azazga, Mekla et Azzfoun) de la wilaya de Tizi Ouzou. Des fiches d'enquêtes conçues spécialement pour le terrain (Saradouni, 2012) ont été renseignées lors de nos différentes missions de terrain, et ce pour récolter l'ensemble des informations nécessaires au calcul des indices de vulnérabilité des différents ouvrages.

Pour analyser les différents paramètres influents, pris en compte dans le calcul de l'indice de vulnérabilité, une approche descriptive multidimensionnelle, dite « ACP » est utilisée. Cette méthode permet d'une part d'identifier les paramètres les plus influents et d'autre part de rendre l'information moins redondante. Ainsi, nous avons procédé au traitement d'un tableau de données rectangulaires avec des individus (retenues collinaires) en lignes et des variables quantitatives (paramètres) en colonnes. Vu la dimension de cette matrice (40 lignes et 18 colonnes), nous avons fait appel au logiciel R®.

La méthode ACP utilisée a mis en évidence, à partir de la matrice des corrélations, les groupes de paramètres ayant des corrélations significatives, autrement dit supérieure au seuil de corrélation minimal $r_{\text{critique}} = 0,312$. Les paramètres corrélés positivement sont des paramètres presque identiques du point de vue des notes partielles et évoluent dans le même sens. Les paramètres corrélés négativement sont opposés du point de vue des notes partielles et sont opposés, lorsque l'un augmente l'autre diminue.

Le nombre d'axe retenus selon les critères du **coude de Cattell** et de **Kaiser** est de trois (Dim1, Dim2 et Dim3) avec un taux d'information (pourcentage d'inertie) de 64.88%. Les résultats ont montré que les variables ayant contribué à la formation de ces trois axes principaux sont les variables corrélées significativement ; ce qui confirme le bon choix de nos axe.

L'étude des individus (retenues collinaires) est effectuée du point de vu des paramètres d'analyse. Ainsi, nous avons identifié trois groupes de retenues collinaires ayant pris des valeurs proches sur certains paramètres. Les retenues se trouvant dans un même groupe sont celles qui ont participé à la présence de corrélations significatives entre les différents paramètres ; ce qui signifie que ces retenues se ressemblent du point de vu de ces paramètres. Les retenues qui

n'ont pas participé aux différentes corrélations sont dites supplémentaires, leur représentation graphique permet de les positionner par rapport aux autres retenues. De même, les paramètres n'ayant pas participé à la formation des axes retenus sont dit supplémentaires et leur représentation permettrait de comprendre comment ces variables sont liées aux anciennes.

Enfin, afin de valoriser les corrélations obtenues pour les différents paramètres pris en compte pour le calcul de l'indice de vulnérabilité « Iv », il serait important d'étudier les liaisons linéaires existantes entre ces derniers. Ceci permettra de comprendre le comportement de ces variables les unes par rapport aux autres pour voir dans quelle mesure une variable dominante peut absorber une autre variable moins prépondérante pour mieux estimer l'indice Iv.

Annexe 1

Fiche d'enquête N°																	
Ingénieur chargé de l'expertise :																	
Date d'expertise :																	
Information sur la retenue																	
Nom attribué :																	
Propriétaire de la retenue :																	
Gestionnaire :																	
Date de mise en service :																	
Typologie de la retenue :																	
Nature du remblai		Argile				Limons				Marnes				Autre			
Etanchéification de la zone de stockage de la retenue								Oui				Non					
LOCALISATION DE LA RETENUE																	
Wilaya :																	
Daïra :																	
Commune :																	
Adresse (Nom du site) :																	
Coordonnées UTM (Universal Transversal Mercator)		X								Y				Z			
Code de la retenue														Note :			
Numéro de la Wilaya																	
Numéro de la Daïra																	
Numéro de la commune																	
Numéro de la retenue																	
Caractéristiques de la retenue																	
Hauteur de la retenue																	
Capacité de la retenue																	
Volume réel exploité																	
Longueur de la digue																	
Ouvrage de vidange																	
Diamètre de la conduite de vidange :																	
Longueur de la conduite :																	
Débit :																	
Nombre de vannes :																	
Diamètre de vanne :																	
Temps de vidange :																	

Photo et autres illustration de la retenue	
--	--

Talus aval de la retenue			Degré de dégradation (Pi)			
			Aucune dégradation 1	Présence de végétation 2	Présence de : Fissures/Terriers/Batillage 3	Présence de : Glissement 4
Type de protection (NeI)	Enrochement	1				
	Béton armé	2				
	Béton bitumineux	3				
	Talus non protégée	4				
Revêtement de la crête			Etat de la crête (Pi)			
			Présence de végétation 1	Présence d’ornières due au passage des véhicules 2	Présence de fissure 3	Affaissement de la crête 4
Type de revêtement (NeI)	Béton armée	1				
	Bitume	2				
	Tout-venant bien compacté	3				
	Sans protection	4				
Déversoir			Etat du déversoir (Pi)			
			Aucune dégradation 1	Présence de tassements 2	Présence de fissures 3	Présence d’obstacles 4
Type de déversoir (NeI)	Latéral sur rive avec seuil en gabion	1				
	Latéral sur rive avec seuil en béton	2				
	Tulipe	3				
	Central placée sur le remblai	4				
Coursier			Etat de dégradation (Pi)			
			Aucune dégradation 1	Présence de végétation ou obturation partielle 2	Altération béton/érosion 3	Ruine et effondrement 4
Type de matériaux (NeI)	Béton armé	1				
	Maçonnerie	2				
	Gabion	3				
	Béton banché	4				
Mur bajoyers			Etat de dégradation (Pi)			
			Aucune dégradation 1	Présence de déformation 2	Fissures ou rupture de joints 3	Perte de stabilité 4
Type de murs bajoyers (NeI)	Béton armé	1				
	Maçonnerie	2				
	Gabion	3				
	Béton banché	4				
Bassin de dissipation d’énergie			Etat de dégradation (Pi)			
			Aucune dégradation 1	Déformation de la structure 2	Déplacement des enrochements 3	Affouillement et érosion 4
Type de matériaux (NeI)	Béton armé/Béton	1				
	Enrochement	2				
	Gabion	3				
	Maçonnerie	4				
Evaluation fonctionnelle						
Ouvrage de prise de vidange (drain)			Etat de dégradation de la vanne (conduite de vidange) Pi			
			Bon état de fonctionnement 1	Conduite exposée a l’air libre (corrodé, rouillée) 2	Fuites (mauvaise état) 3	Non fonctionnelle, détérioré et/ou obturé 4
Type de conduite (NeI)	Conduite en PEHD	1				
	Conduite galvanisé	2				
	Conduite en fente	3				
	Conduite en acier noir	4				

Destination de la retenue		Accessibilité de la retenue (Pi)			
		Accessible par route revêtue 1	Accessible par route carrossable 2	Accessible par sentier piéton 3	Retenu inaccessible 4
Destination de la retenue ((Nei)	Eau pour l'irrigation 1				
	Retenue pour lutter contre les inondations 2				
	Eau pour l'alimentation 3				
	Eau pour l'industrie 4				
Fréquence d'entretien		Risque en aval (Pi)			
		Aucun risque 1	Routes 2	Habitations 3	Équipements publics 4
Fréquence d'entretien (Nei)	Trimestrielle 1				
	Semestrielle 2				
	Annuelle 3				
	Absence d'entretien 4				
Etat d'envasement de la cuve		Age de la retenue (Pi)			
		< a 10 ans 1	Entre 10 et 20 ans 2	Entre 20 et 30 ans 3	> a 30 ans 4
Typologie d'entrée d'eau (Nei)	Canalisation 1				
	Talweg (fente de neige)2				
	Talweg (ruissèlement) 3				
	Source 4				

Commentaires et autres remarques		
Avis : une intervention s'avèrent-t-elle nécessaire ?	OUI	NON

Annexe 2

Fiche d'enquête N° 04																	
Ingénieur chargé de l'expertise : DJEMA Fatiha et HAOULI Sonia																	
Date d'expertise : 1989 et 2019																	
Information sur la retenue																	
Nom attribué : Ait Toudert N°171																	
Propriétaire de la retenue : DRE T-O																	
Gestionnaire : NEANT																	
Date de mise en service : 1989																	
Typologie de la retenue : En remblai homogène																	
Nature du remblai		Argile				Limons				Marnes				Autre			
		X X															
Etanchéifiassions de la zone de stockage de la retenue										Oui				Non			
														X X			
LOCALISATION DE LA RETENUE																	
Wilaya : Tizi-Ouzou																	
Daïra : Ouacif																	
Commune : Ait Toudart																	
Adresse (Nom du site) : N°171																	
Coordonnées UTM (Universal Transversal Mercator)		X (m)								Y (m)				Z (m)			
		604531.80								4043971.87				660			
Code de la retenue		0	2	1	5	6	7	0	3					Note :			
Numéro de la Wilaya		15															
Numéro de la Daïra		15															
Numéro de la commune		02															
Numéro de la retenue		171															
Caractéristiques de la retenue																	
Hauteur de la retenue		12 m															
Capacité de la retenue		60 000 m³															
Volume réel exploité		60 000 m³															
Longueur de la digue																	
Ouvrage de vidange																	
Diamètre de la conduite de vidange : 200 mm																	
Longueur de la conduite : /																	
Débit : /																	
Nombre de vannes : /																	
Diamètre de vanne : /																	
Temps de vidange : /																	



IMPLANTATION DE LA RETENUE				Différents climats existants (Pi)												
				Climat désertique des grandes étendues sahariennes 1				Climat semi-aride 2			Climat sec (hiver-été) avec de fort écart de température 3			Climat humide avec des embruns en bord de mer 4		
Lieu d'implantation de la retenue (Nei)	Montagne	1														
	Vallées et plaines	2		X X												
	Haut plateau et nord de l'atlas saharien	3														
	Région côtière	4														
ZONE SISMIQUE				Site d'implantation (Pi)												
				Rase campagne 1				Zone rural 2			Zone industrielle 3			Zone urbaine 4		
Zone sismique (Nei)	Zone 0	1														
	Zone I	1														
	Zone IIa	2		X X												
	Zone IIb	3														
	Zone III	4														
Type de sol				Effet de site (Pi)												
				Présence de nappe 1				Présence de tassements 2			Présence de fissures en surface 3			Glissement de terrain 4		
Type de sol (Nei)	Catégorie S1 (rocheux)	1														
	Catégorie S2 (ferme)	2														
	Catégorie S3 (meuble)	3														
	Catégorie S4 (très meuble)	4												X X		
Zone de neige	Zone de neige		Zone de neige													
			Zone A 4	Zone B 3	Zone C 2		Zone D 1		Les pondérations Pi sont prises égales à 1.							
	(Nei)	X X														
Zone de vent				Zone de vent												
				Pas d'action 1				Zone I 2			Zone II 3			Zone III 4		
Zone de vent	(Nei)			X X												
	Pi= Ph+Pc+Pt+Ps	Hauteur de la digue (Ph)		Catégorie du terrain (Pc)				Facteur topographique (Pt)			Forme de surface du plan d'eau (Ps)					
		H < 5m	0.25		Catégorie I	0.25			Site I	0.25			En arc	0.25		
		5<H<10 m	0.50	X X	Catégorie II	0.50	X X		Site II	0.50			Rectangulaire	0.50		
		10<H<15 m	0.75		Catégorie III	0.75			Site III	0.75	X X		circulaire	0.75	X X	
		H>15m	1.00		Catégorie IV	1.00			Site IV	1.00			carrée	1.00		
Evaluation structurelle																
Etanchéité du corps de la digue				Etat d'étanchéité (Pi)												
				Talus aval sec 1				Présence de suintement 2			Fuites légères 3			Fuites importantes 4		
Type d'étanchéité (Nei)	Digue homogène en argile compacté	1		X X												
	Noyau central argileux compacté	2														
	Paroi moulé	3														
	Masque étanche amont	4														
Talus amont de la retenue				Degré de dégradation (Pi)												
				Aucune dégradation 1				Présence de végétation 2			Présence de : Fissures/Terriers/Batillage 3			Présence de : Glissement 4		
Type de protection (Nei)	Enrochement	1		X				X								
	Béton armé	2														
	Béton bitumineux	3														
	Talus non protégée	4														

Talus aval de la retenue		Degré de dégradation (Pi)			
		Aucune dégradation 1	Présence de végétation 2	Présence de : Fissures/Terriers/Batillage 3	Présence de : Glissement 4
Type de protection (Nei)	Enrochement 1				
	Béton armé 2				
	Béton bitumineux 3				
	Talus non protégée 4	X X			
Revêtement de la crête		Etat de la crête (Pi)			
		Présence de végétation 1	Présence d’ornières due au passage des véhicules 2	Présence de fissure 3	Affaissement de la crête 4
Type de revêtement (Nei)	Béton armée 1				
	Bitume 2				
	Tout-venant bien compacté 3				
	Sans protection 4	X X		X	X
Déversoir		Etat du déversoir (Pi)			
		Aucune dégradation 1	Présence de tassements 2	Présence de fissures 3	Présence d’obstacles 4
Type de déversoir (Nei)	Latéral sur rive avec seuil en gabion 1				
	Latéral sur rive avec seuil en béton 2	X			X
	Tulipe 3				
	Central placée sur le remblai 4				
Coursier		Etat de dégradation (Pi)			
		Aucune dégradation 1	Présence de végétation ou obturation partielle 2	Altération béton/érosion 3	Ruine et effondrement 4
Type de matériaux (Nei)	Béton armé 1	X X	X		X X
	Maçonnerie 2				
	Gabion 3				
	Béton banché 4				
Mur bajoyers		Etat de dégradation (Pi)			
		Aucune dégradation 1	Présence de déformation 2	Fissures ou rupture de joints 3	Perte de stabilité 4
Type de murs bajoyers (Nei)	Béton armé 1	X		X	X
	Maçonnerie 2				
	Gabion 3				
	Béton banché 4				
Bassin de dissipation d’énergie		Etat de dégradation (Pi)			
		Aucune dégradation 1	Déformation de la structure 2	Déplacement des enrochements 3	Affouillement et érosion 4
Type de matériaux	Béton armé/Béton 1	X	X	X	X
	Enrochement 2				
	Gabion 3				
	Maçonnerie 4				
Evaluation fonctionnelle					
Ouvrage de prise de vidange (drain)		Etat de dégradation de la vanne (conduite de vidange) Pi			
		Bon état de fonctionnement 1	Conduite exposée a l’air libre (corrodé, rouillée) 2	Fuites (mauvaise état) 3	Non fonctionnelle, détérioré et/ou obturé 4
Type de conduite (Nei)	Conduite en PEHD 1				
	Conduite galvanisé 2				
	Conduite en fente 3				
	Conduite en acier noir 4	X			X
Accessibilité de la retenue (Pi)					

Destination de la retenue		Accessible par route revêtue 1	Accessible par route carrossable 2	Accessible par sentier piéton 3	Retenu inaccessible 4
Destination de la retenue ((Nei)	Eau pour l'irrigation 1		X X		
	Retenue pour lutter contre les inondations 2				
	Eau pour l'alimentation 3				
	Eau pour l'industrie 4				
Fréquence d'entretien		Risque en aval (Pi)			
		Aucun risque 1	Routes 2	Habitations 3	Équipements publics 4
Fréquence d'entretien (Nei)	Trimestrielle 1				
	Semestrielle 2				
	Annuelle 3				
	Absence d'entretient 4	X X			
Etat d'envasement de la cuve		Age de la retenue (Pi)			
		< a 10 ans 1	Entre 10 et 20 ans 2	Entre 20 et 30 ans 3	> a 30 ans 4
Typologie d'entrée d'eau (Nei)	Canalisation 1				
	Talweg (fente de neige) 2				
	Talweg (ruissèlement) 3	X		X	
	Source 4				

Commentaires et autres remarques	
Avis : une intervention s’avèrent-t-elle nécessaire ?	OUI
	X
NON	

Annexe 3

Annexe 3

Présentation du logiciel R®

3.1. Définition

Le R est un logiciel de statistique créé par Ross Ihaka & Robert Gentleman (**Vincent. R, 2014**). Il est dérivé du langage S et développé depuis une dizaine d'années par un groupe de volontaires de différents pays. Ce logiciel est libre, gratuit et multiplateforme : il est à la fois un langage informatique et un environnement de travail. Etant un logiciel Freeware accessible au large public, il peut s'installer sur différents systèmes d'exploitation, tel que Windows, MacOS X, Linux...

R est un logiciel orienté objet dans sa programmation et son utilisation. Il offre des fonctions de base très utiles dans le concept de la modularité qui facilite son interprétation via son interface très riche, appuyée par son grand nombre de packages. Ces derniers sont installés en local ou à récupérer à distance par téléchargement. Ses commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage relativement simple. Les résultats sont affichés sous forme de texte et de graphes visualisés directement dans une fenêtre qui leur est propre

3.2. Pourquoi utiliser le logiciel R ?

R est un logiciel gratuit à code source ouvert, comme il est aussi un outil très puissant et très complet particulièrement bien adapté pour la mise en œuvre informatique de méthodes statistiques. Bien qu'il soit plus difficile d'accès que certains autres logiciels étant donné qu'il n'est pas conçu pour être utilisé à l'aide de clic de souris dans des menus, l'avantage de son utilisation en est toutefois double :

En premier, l'approche est pédagogique puisqu'il faut maîtriser les méthodes statistiques pour les mettre en œuvre. En second, lorsqu'on maîtrise le langage R on devient capable de créer ses propres outils par succession de lignes de commandes exécutées séquentiellement dont les résultats sont très pertinents.

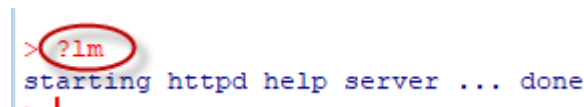
3.3. Fonctionnement du logiciel R

Dans le logiciel R®, on s'appuie sur une succession de commandes tapées sur une console apparaissant à l'ouverture de la fenêtre principale. Ces commandes servent à entrer les données nécessaires pour l'exécution des calculs liés aux différents besoins tel que l'ACP ; ce qui nous permet d'obtenir des résultats corrects et précis en sortie. Quand R est utilisé, les variables, les données, les fonctions, les résultats, etc., sont stockés dans la mémoire de l'ordinateur sous forme d'*objets*. Ces objets sont caractérisés bien sûr par leur nom et leur contenu, mais aussi par des *attributs* qui vont spécifier le type de données représenté par un objet. L'utilisateur va

agir sur ces objets avec des *opérateurs* (arithmétiques, logiques, de comparaison...) et des *fonctions* (qui sont elles-mêmes des objets).

Lorsque l'on travaille avec R, on utilise souvent un script (genre d'un bloque note) ou l'on écrit souvent des textes contenant du code et des commandes dont on a besoin pour notre travail. Pour s'y retrouver, on ajoute généralement des commentaires indiquant pourquoi et comment on a réalisé certaines des instructions présentes dans le script.

Le logiciel R® dispose d'une aide en ligne extrêmement utile disponible directement pour une fonction donnée, en utilisant le point d'interrogation suivi de la fonction à rechercher par exemple (figure 3.1):



```
> ?lm
starting httpd help server ... done
```

Figure 3.1: Recherche d'une fonction

3.3.1. Installation du logiciel R® et ses packages

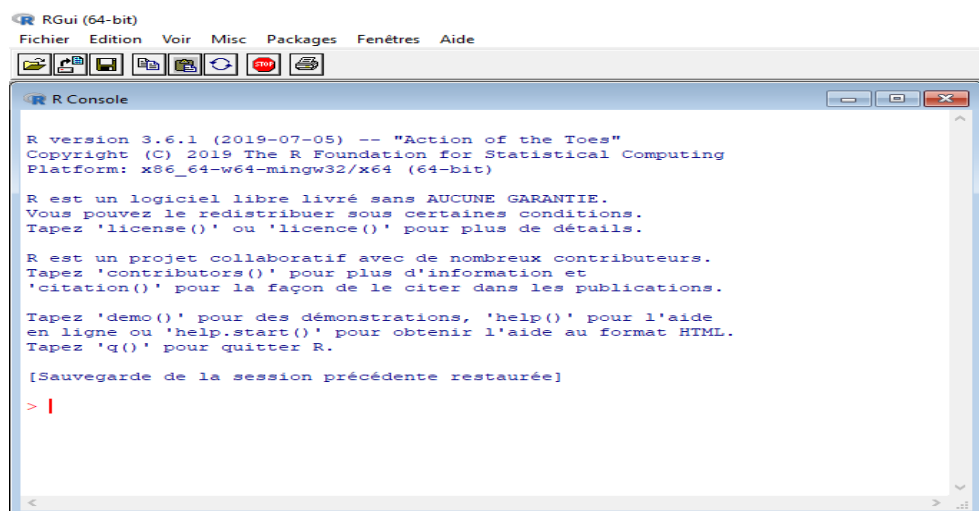
R est disponible sur la plupart des environnements de travail (Windows, MacOS ou les systèmes de type UNIX), comme il est distribué gratuitement sur le net à l'adresse : <http://www.r-project.org/> et sur des sites miroirs à l'adresse : <http://cran.r-project.org/>. Ainsi, tous les fichiers utiles à l'installation ou à la mise à jour sont accessibles à partir de différents endroits du monde.

Une fois l'installation fini, on clique sur le programme dans le répertoire où il est installé

ou à partir du raccourci qui s'est installé sur le bureau



A chaque démarrage, R ouvre une console où s'affiche le texte représenté dans la figure 3.2 :



```
RGui (64-bit)
Fichier  Edition  Voir  Misc  Packages  Fenêtres  Aide

R Console

R version 3.6.1 (2019-07-05) -- "Action of the Toes"
Copyright (C) 2019 The R Foundation for Statistical Computing
Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit)

R est un logiciel libre livré sans AUCUNE GARANTIE.
Vous pouvez le redistribuer sous certaines conditions.
Tapez 'license()' ou 'licence()' pour plus de détails.

R est un projet collaboratif avec de nombreux contributeurs.
Tapez 'contributors()' pour plus d'information et
'citation()' pour la façon de le citer dans les publications.

Tapez 'demo()' pour des démonstrations, 'help()' pour l'aide
en ligne ou 'help.start()' pour obtenir l'aide au format HTML.
Tapez 'q()' pour quitter R.

[Sauvegarde de la session précédente restaurée]

> |
```

Figure 3.2: Interface de R au démarrage

R® fonctionne en mode question réponse. Le symbole '>' appelé prompt signifie que le logiciel attend nos commandes qui doivent être bien libellées et rédigées selon le format de programmation adéquat. Plusieurs fonctions de différents packages sont disponibles dans le logiciel R® pour le calcul de l'ACP. Leurs téléchargement est primordiale pour le bon fonctionnement du logiciel. Leurs installation se fait de deux manières (figure 3.3) :

- Via la commande : > **Install. Packages**
- Via le menu : packages => choisir le site miroir de CRAN => installer le(s) package(s)

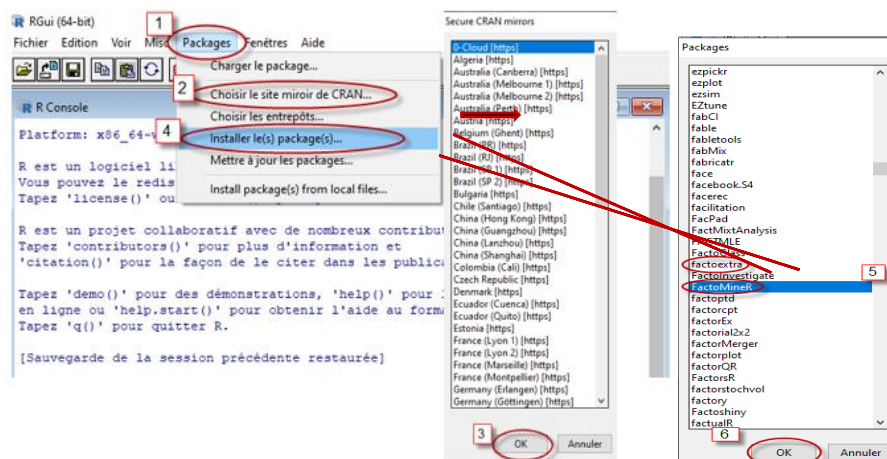


Figure 3.3: Étapes d'installation des packages.

Pour utiliser un package, on doit faire son chargement soit :

- Via le menu déroulant,
- Ou bien via la commande Library.

3.4. Les étapes de calcul dans R

a- Type de données utilisées

Les données utilisées sont importées à partir du logiciel Excel®. A préciser qu'avant de les importer, elles doivent être au préalable enregistrées sous format « CSV : comma Separated Values » avec séparateur point-virgule (figure 3.4).

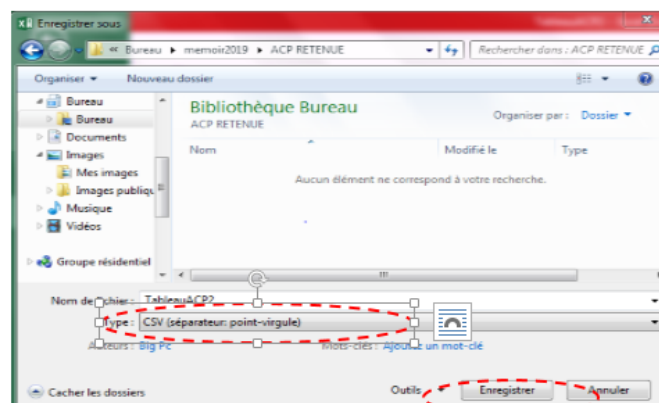


Figure 2.4: Enregistrement des données sous forma CSV.

b- Importation des données

Pour importer les données vers la console, on s'appuie sur la commande :

```
>Données ACP <-read.csv ("emplacement de mes données.csv", header = TRUE, sep=";").
```

Dans notre cas pour importe le tableau de données, nous utilisons la commande suivante :

```
>TableauACP2 <- read.csv ("D:/ACP2/TableauACP2.csv", header = TRUE, sep=";")
```

c- Visualisation des données

Pour visualiser le contenu du tableau de données sous R, on utilise la commande :

```
>print(Données), soit : > print(TableauACP2)
```

d- Traitement statistique des données

Pour extraire la moyenne et l'écart type, on utilise la commande summary (figure 3.5),

```
> summary (Données), Soit: > summary (TableauACP2)
```

```
> summary(TableauACP2)
Implantation.de.la.retenue Etanchéité.du.corps.de.la.retenue
Min. : 4.000 valeur min et Min. : 1.000
1st Qu.: 4.000 max dparamètre 1st Qu.: 1.000
Median : 6.000 Median : 2.000
Mean : 6.171 Mean : 2.500
3rd Qu.: 8.000 3rd Qu.: 3.000
Max. : 12.000 Max. : 4.000
Type.de.protection.du.talus.amont.de.la.retenue
Min. : 2.000
1st Qu.: 2.000
Median : 2.000
Mean : 2.500
3rd Qu.: 3.500
Max. : 12.000
```

Figure 3.5 : Données statistiques.

e- Calcul de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation est obtenue avec la commande suivante :

```
> MatriceCor <- cor (MonTableau, method = c ("pearson", "kendall", "spearman"))
```

```
Soit: Matrice <- cor (TableauACP2, method = c ("pearson", "kendall", "spearman"))
```

f- Visualisation de la matrice de corrélation

Pour visualiser le contenu la matrice de corrélation sous R, on utilise la commande :

```
> print(MatriceCor) soit : > print(Matrice)
```

g- Représentation graphique de la matrice de corrélation

Pour la représentation graphique de la matrice de corrélation, il y a lieu d'abord d'installer le package "**corrplot**" conformément aux étapes données dans la figure 3.3. Par la suite, et pour la visualisation graphique de cette matrice, on applique les commandes suivantes :

```
> Library (corrplot)
```

```
> corrplot (Matrice [1: P, 1: P], tl.cex=0.5)
```

Soit:

> Library (corrplot)

>corrplot (Matrice [1:11, 1:11], tl.cex=0.5)

tl.cex = 0.5 : taille du texte (variables)

h- Application de l'ACP

L'application de l'ACP nécessite d'abord le téléchargement des packages "FactoMineR" pour l'analyse et "factoextra" pour la visualisation des données (figure 3.3), en utilisant les commandes suivantes :

> Library ("FactoMineR")

> Library ("factoextra").

i- Choix des variables actives :

Les variables actives sont les variables qui participent à l'ACP (voir chapitre 3). Elles sont choisis par la commande :

> Données ACP.active <- Données ACP [1 : n, 1 : p]

Soit : > TableauACP2.active <- TableauACP2 [1:40,1:11]

j- Traitement de l'ACP par le logiciel R®:

La commande qui permet le traitement de la fonction ACP dans R et d'afficher les interprétations graphiques est la suivante :

> res.pca <- PCA (TableauACP2.active, ncp = 3, graph = TRUE)

Soit : res.pca <- PCA (TableauACP2.active, ncp = 3, graph = TRUE)

- TableauACP2.active (tableau de variable et /ou individus actif, ayant participé à L'ACP)
- ncp : étant le nombre d'axes à afficher
- graph = TRUE : pour affiché les graphes des variables et des individus.
- graphe = FALSE : dans ce cas les graphes ne seront pas affiché.

k- Affichage des résultats de l'ACP

Pour avoir un aperçu des résultats avec leurs noms et description inclus dans des objets, on utilise la commande suivante (figure 3.6) :

>print (res.pca)

```

> print(res.pca)
**Results for the Principal Component Analysis (PCA)**
The analysis was performed on 35 individuals, described by 11 variables.
The results are available in the following objects:

      name      description
1  "$eig"      "eigenvalues"
2  "$var"      "results for the variables"
3  "$var$coord" "coord. for the variables"
4  "$var$cor"   "correlations variables - dimensions"
5  "$var$cos2"  "cos2 for the variables"
6  "$var$contrib" "contributions of the variables"
7  "$ind"      "results for the individuals"
8  "$ind$coord" "coord. for the individuals"
9  "$ind$cos2"  "cos2 for the individuals"
10 "$ind$contrib" "contributions of the individuals"
11 "$call"     "summary statistics"
12 "$call$centre" "mean of the variables"
13 "$call$secart.type" "standard error of the variables"
14 "$call$row.w" "weights for the individuals"
15 "$call$col.w" "weights for the variables"
> |

```

Figure 3.6: objets des résultats de l'ACP

Après l'exécution de l'ACP, on peut accéder aux résultats (chapitre 3), en utilisant différentes instructions :

- Résultats des variables

```

> res.var <- get_pca_var(res.pca)
> res.var$coord  ➡ # pour avoir les Coordonnées des variables
> res.var$contrib ➡ # pour avoir les Contributions des variables
> res.var$cos2   ➡ # pour avoir la Qualité de représentation des variables

```

- Résultats des individus

```

> res.ind <- get_pca_ind(res.pca)
> res.ind$coord  ➡ # pour avoir les Coordonnées des individus
> res.ind$contrib ➡ # pour avoir les Contributions des individus
> res.ind$cos2   ➡ # pour avoir la Qualité de représentation des individus

```

- Les valeurs propres

```

> eig.val <- get_eigenvalue(res.pca)
> eig.val

```

- Teste de Bartlett

Le test de Bartlett (chapitre 3) est exécuté avec l'instruction suivante

```

> Bartlett. Test (TableauACP2)

```

- Affichage du graphe des valeurs propres (des variances)

```

> fviz_eig(res.pca, addlabels = TRUE, ylim = c(0, 40))

```

- Addlabels = TRUE : pour afficher le pourcentage de la variance pour les variables sur le graphe des valeurs propres.
- ylim= c(0.50) : Limite min et max des variances à afficher sur l'axe des ordonnées.

- **Affichage des graphes des cercles de corrélation des variables**

```
>fviz_pca_var (res.pca, col.var = "cos2", axes = c (1,2), labelsiz = 4,
  gradient.cols = c ("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),geom.var = c ("point", "text"),
  repel = TRUE # Évite le chevauchement de texte)
```

- Axes = c(1,2) : le plan factoriel à afficher. Par exemple les dimensions 1 et 2
- Labelsiz : taille du texte, par exemple : labelsiz = 4.
- geom.ind = c ("point", "texte") : pour afficher à la fois les points et le texte de la notation

Le codage des couleurs

- "#00AFBB" : le code de la couleur bleu.
- #E7B800 : le code de la couleur Jaune.
- #FC4E07 : le code de la couleur rouge.

- **Affichage des graphes des individus**

```
>fviz_pca_ind (res.pca, col.ind = "cos2", axes = c (1, 2),
  gradient.cols = c ("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),
  repel = TRUE # Évite le chevauchement de texte)
```

- **Liens entre les variables et les individus**

Pour visualiser les liens existants entre les variables et les individus on réalise ce qu'on appelle dans le langage R® un biplot simple, qui consiste à les afficher variables et les individus dans un même graphe, en exécutant l'instruction qui suit :

```
>fviz_pca_biplot (res.pca, repel = TRUE, labelsiz = 3, arrowsiz = 0,
  col.var = "#00AFBB", # Couleur des variables
  col.ind = "#FC4E07", # Couleur des individus)
- arrowsiz : utilisé pour modifier la taille et l'épaisseur des flèches.
```

- **Positionner les variables supplémentaires**

Pour positionner les variables supplémentaires qui n'ont pas intervenu dans la confection des axes nous utilisons la commande suivante :

```
>res.pca <- PCA (TableauACP2, quanti.sup= 1, ncp = 3, graph = TRUE)
- quanti.sup : utilisé pour ajouter des variables supplémentaires.
```

1- Importation des résultats vers Excel

L'importation de la matrice de corrélation vers un fichier Excel se fait avec la commande suivante :

```
>write.infile (Matrice, "emplacement de l'enregistrement de la matrice/.csv", sep = ";")
```

Soit :

```
>write.infile (Matrice, "D : /master/MASTER 2/semstre 2/00 my memoire/matrice  
cor.csv", sep = ";")
```

L'importation des résultats de l'ACP vers un fichier Excel se fait avec la commande suivante :

```
>write.infile (res.pca, "emplacement de l'enregistrement des résultats/.csv", sep = ";")
```

Soit :

```
> write.infile (res.pca, "D : /master/MASTER 2/semstre 2/00 my memoire/résaultats ACP  
.csv", sep = ";")
```

- pour les graphes on utilise la commande « **copier-coller** ».

Références bibliographiques

BOUCHIER A., "L'analyse en composantes principales, AGRO.M - INRA - Formation Permanente", Janvier 2006.

BENLAOUKLI A., TOUAIBIA B., " L'expérience algérienne dans le domaine des études de retenues collinaires ", revue des sciences de l'eau, 2004, pp 153 -162.

DAGNELIE P., "Statistique théorique et appliquée, inférence statistique à une et à deux dimensions", 3ème édition de Boeck Université, 2011.

DUBY C, ROBIN S. "Analyse en Composantes Principales, Institut National Agronomique" Paris – Grignon, 2008.

DRE T.O., "Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Tizi-Ouzou".

DTR B-C 2-48, "Règles parasismiques algériennes (addenda 2003) ", CGS, Alger, juin 2003.

DTR C 2-4.7, "Règlement neige et vent 1999, Ministère de l'habitat", Alger, juillet 1999.

FIELD A P. Discovering Statistics Using SPSS for Windows: Advanced Techniques for the Beginner, Sage Publications, 496 pages, 2000.

LABATTE J. M., "Biostatistiques, Rappels de cours et travaux dirigés, université" Angers, 2008.

HAMMOUM H., "Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des réservoirs en béton armé". Développement de méthodes d'aide à l'expertise, Thèse de doctorat es science en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2012.

NASSIMA MILOUDI, HOCINE HAMMOUM, KARIMA BOUZELHA, BOUSSAD METNA ET ANNE PANTET, Contribution to assess the water storage tank vulnerability by principal component analysis, Journal of Civil Structural Health Monitoring, april 2017.

HUSSEN F, SEBASTIEN L, JEROME P. "Analyse de données avec R, Presses Universitaires de Rennes", 2009.

MATHIEU G., "Méthodologie d'évaluation des ouvrages hydrauliques en béton appliquée un patrimoine", Annales du BTP, N° 5-6, 2003.

PNUD/OPE, "Ressources en eau dans les pays de l'Afrique du Nord : Guide maghrébin pour l'exécution des études et des travaux de retenues collinaires", Projet RAB/80/011, 1987, OPU, Alger, 1p.

MEKAOUSSI H., "La Gestion des Bassins Versants : Outil de Résolution des Conflits dans les Zones Semi – Arides en Algérie", 2010, pp 150 -157.

MILOUDI N. "Contribution à l'étude de la vulnérabilité des réservoirs en béton par Analyse des composantes principales", Mémoire de Magister en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.

PIERRE L, REMY D, BENOIT L. Le logiciel R : maitriser le langage, effectuer des analyses (bio) statistiques 2014.

RUBEN D., Le test de sphéricité de Bartlett et les mesures d'adéquacité de l'échantillonnage avant une ACP, publié le 4 Aout 2011. (<http://ouvrepot.over-blog.com/article-le-test-de-sphericite-de-bartlett-et-les-mesures-d-adequacite-de-l-echantillonnage-avant-toute-acp-80884843.html>).

SALEM A., " les retenues collinaires - résultats d'une expérience ", Algérie équipement, 1991.

SARADOUNI F. "Contribution à l'étude de la vulnérabilité des retenues collinaires vis - à-vis des aléas naturels, dans un système d'information géographique (SIG)", Mémoire de Magister en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.

TALON A., BOISSIER D, PEYRAS L. "Analyse des risques : Identification et estimation, démarches d'analyses des risques, méthodes qualitatives d'analyse de risque", université numérique ingénierie et technologie, mars 2009.

VINCENT R., "S'initier à l'analyse des données avec le logiciel R", 2014

ZWINGELSTEIN G., "La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM". Paris : Hermès Editions, 666 p, 1996.