

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique et environnement

Présenté par :

Melle MILOUDI Nassima
Ingénieur d'état en Génie Civil

THEME

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA VULNERABILITE

DES RESERVOIRS EN BETON

PAR ANALYSEE DES COMPOSANTES PRINCIPALES

Mémoire soutenu le : 11/12/2014 devant le jury composé de :

Mr GABI Smail	Professeur (UMMTO)	Président
Mme BOUZELHA Karima	Professeur (UMMTO)	Rapporteur
Mr DRIZI Said	Maître de conférences A (UMMTO)	Examineur
Mr HAMMOUM Hocine	Maître de conférences A (UMMTO)	Examineur
Mr METNA Boussad	Maitre assistant classe A	Invité

Remerciements

*En premier lieu, je remercie **Allah** le tout-puissant de m'avoir aidé durant toute ma vie, sans lui ce manuscrit n'aurait pas pu voir le jour.*

*Mes remerciements s'adressent aussi à ma directrice de recherche Madame **BOUZELHA Karima**, professeur au Département du Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, pour avoir accepté de me diriger et guider dans cette recherche, pour son soutien inconditionnel, et avec qui j'ai établi une relation de confiance. Je tiens également à la remercier pour sa grande disponibilité.*

*Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sous sa forme actuelle sans l'apport de Monsieur **HAMMOUM Hocine**, maître de conférences A au Département Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou. Je le remercie pour m'avoir aidé en me prodiguant conseils et encouragements. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **METNA Boussad**, maître assistant A enseignant au Département d'Agronomie de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou. Il m'a guidé et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer dans mon travail. Qu'il trouve ici toute ma gratitude et mes sincères respects.*

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

*Je voudrais également adresser mes sincères remerciements aux **fonctionnaires de l'ADE** de la daïra de Draa Ben Khedda, de Labraa Nath Irathen, et de la commune de Mekla pour m'avoir accueillie au sein de leur service et offert un cadre propice pour le déroulement de mes expertises.*

*Je profite pour adresser mes remerciements également à Monsieur **ALICHE Amar**, Doctorant au Département Génie Civil de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, qui m'a accompagné tout au long de ma mission d'expertise.*

*J'adresse mes remerciements à tous mes amis(es) et à toute ma famille, tout particulièrement **mon père et ma mère** pour leur soutien et leurs encouragements.*

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

À mon père

À ma mère

À mes frères et sœurs

À tous ceux qui me sont chers

Résumé

Pour prédire le niveau de dégradation et de vieillissement pouvant survenir à grande échelle dans un réservoir de stockage d'eau potable, le concept de vulnérabilité à certains aléas naturels (neige, vent, séisme ... etc.) est utilisé. Cette méthode, dite de diagnostic est basée sur le calcul de l'indice de vulnérabilité et fait intervenir treize (13) paramètres influents pour trois types d'analyses (environnementale, structurale et fonctionnelle).

Dans le cadre de cette étude, et afin de mettre en valeur la sensibilité de certains de ces paramètres par rapport à d'autres et rendre l'information moins redondante, nous utilisons une méthode statistique dite ACP « Analyse en Composantes Principales ». Cette méthode qui fait partie du groupe de méthodes descriptives multidimensionnelles, appelées méthodes factorielles, 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). L'ACP a été souvent utilisé dans de nombreux domaines pour sa capacité à capturer les relations linéaires entre les variables et les ressemblances entre individus. Ainsi, dans ce travail de recherche, cette méthode est testée avec succès sur un parc réel composé de 54 réservoirs.

Mots clés : Réservoir en béton, Vulnérabilité, Diagnostic, ACP, Analyse.

Abstract

To predict the level of degradation and aging which can arise on a large scale in a storage tank of drinking water, the concept of vulnerability with some natural hazards (as snow, wind, earthquake etc...) is used. This method of diagnosis, based on the calculation of vulnerability index involves thirteen (13) influencing parameters for 3 kinds of analysis (environmental, structural and functional).

In our study, and to highlight the sensibility of some of these parameters compared with others and make the information less redundant, we use a statistical method called PCA (Principal Component Analysis). This method which is a part of the group of multidimensional descriptive methods called factorial methods consists in transforming linked variables (said "correlated" in statistic) in new uncorrelated variables. These new variables are called "main components" (or main axes). The PCA was often used in numerous fields for its simplicity and its capacity to capture the linear relations between variables and resemblances between individuals. In this research, this method is successfully tested on a real park compound of 53 tanks.

Keywords: Concrete tank, Vulnerability, Diagnosis, PCA, Analyses.

Principales notations rencontrées dans la thèse par ordre d'apparition.

Symboles	Significations	Unités
N_{ei} :	note élémentaire d'un réservoir	[—]
P_i :	coefficient de pondération d'un réservoir	[—]
I_v :	indice de vulnérabilité d'un réservoir	[—]
P_h :	hauteur d'un réservoir	[m]
P_c :	catégorie de terrain	[m]
P_t :	facteur topographique	[m]
P_s :	Etat de la surface du réservoir	[m]
X :	matricée de tableau de données	[—]
p_i :	poids de chaque individu	[—]
D :	matrice diagonale des poids	[—]
$\bar{X}_j$:	moyenne de chaque variable j	[—]
σ_j :	écart type de chaque variable j	[—]
X_c :	matrice des données centrées	[—]
r :	coefficient de corrélation entre les différents variables	[—]
G :	centre de gravité du nuage de point	[m]
Var_x :	variance de la variable x	[—]
COV_{xy} :	covariance des variables x et y	[—]
I_G :	inertie totale du nuage de point	[m ⁴]
λ_i :	valeur propre	[—]
C_k :	composante principale	[—]
C :	matrice des composantes principales	[—]
u_i :	axe factoriel	[—]
Δ :	matrice des axes principaux	[—]
Y :	matrice des données centrées réduites	[—]
R :	matrice des corrélations	[—]
α :	indice de significativité (risque d'erreur)	[—]
F_i :	axes principaux	[—]

Introduction générale

Chapitre 1 : Synthèse bibliographique

Introduction	1
1.1. Généralités sur les réservoirs	1
1.2. Etude de la vulnérabilité	4
1.3. Analyse de risques par l'estimation de la vulnérabilité des structures	5
1.4. Différentes approches pour l'analyse des risques	6
1.4.1. Méthodes internes	6
1.4.1.1. Approche par modèles physiques	7
1.4.1.2. La modélisation fonctionnelle par la Sûreté de Fonctionnement	15
1.4.2. Les méthodes externes	21
1.4.2.1. Analyse des risques par expertise	22
1.4.2.2. Analyse des risques à partir des statistiques	30
Conclusion	36

Chapitre 2 : Evaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton

vis-à-vis de certains aléas naturels, par une approche par expertise

Introduction	37
2.1. Evaluation de la vulnérabilité d'un réservoir	37
2.2. Evaluation environnementale	40
2.2.1. Implantation de l'ouvrage	40
2.2.2. Zone sismique	41
2.2.3. Type de sol	41
2.2.4. Zone de la neige	42
2.2.5. Action du vent	43
2.3. Evaluation structurelle	44
2.3.1. Type de structure	44
2.3.2. Type de fondation	45
2.3.3. Etanchéité des parois	46
2.3.4. Etanchéité de la couverture	47
2.3.5. Défauts apparents	47
2.4. Evaluation fonctionnelle	48
2.4.1 Rôle du réservoir	48
2.4.2. Importance du réservoir	49
2.4.3. Fréquence d'entretien	50

2.5. Classification	50
2.6. Application de la méthode de l'indice de vulnérabilité - Etude de cas	51
2.6.1. Evaluation de la vulnérabilité du réservoir à la mise en service en 2010	53
2.6.2. Evaluation de la vulnérabilité en cours d'exploitation (mars 2014)	54
Conclusion.....	61

Chapitre 3 : Exposé de la méthode ACP

Introduction	62
3.1. Définition.....	62
3.2. Historique	63
3.3. Champs d'application	63
3.4. Logiciels d'application	63
3.5. Données d'une ACP	64
3.6. Objectif d'une ACP	65
3.6.1. Problématique	68
3.6.2. Solution	69
3.6.2.1. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des individus	69
3.6.2.2. Principe de construction de l'espace factoriel à partir du nuage des variables.	77
3.7. Analyse en composantes principales normée	78
3.7.1. Matrice des données centrées réduites	78
3.7.2. Matrice de corrélation	79
3.7.3. Particularité de l'ACP normée	80
3.8. Interprétation des résultats d'une ACP	80
3.8.1. Etude des individus	81
3.8.1.1. Représentation des individus dans les nouveaux axes.....	81
3.8.1.2. Qualité de représentation des individus	82
3.8.1.3. Interprétation des axes factoriels par les points individus	83
3.8.2. Etude des variables.....	83
3.8.2.1. Représentation des variables dans les nouveaux axes	83
3.8.2.2. Etude des liaisons entre les variables.....	85
3.8.3. Lien entre les deux études	85
3.9. Individus et variables supplémentaires.....	86
Conclusion.....	86

Chapitre 4 : Application de l'ACP à un parc de réservoirs

Introduction	87
4.1. Données brute pour l'application de l'ACP	87
4.2. L'ACP est elle applicable ?	91
4.2.1. Les données sont-elles factorisables ?	91
4.2.1.1. Test de sphéricité de Bartlett	92
4.2.2. La matrice des corrélations est elle singulière?.....	93
4.3. Vérification des étapes de l'ACP.....	100
4.3.1. Moyennes et écarts types des variables.....	100
4.3.2. Centrage du tableau de données (matrice centrée).....	101
4.3.3. Réduction du tableau de données (matrice centrée réduites)	102
4.3.4. Matrice des corrélations	104
4.3.5. Choix du nombre d'axe à retenir.....	105
4.3.5.1. Vecteurs propres	105
4.3.5.2. Valeurs propres et leur variance expliquée.....	106
4.3.6. Etudes des variables	107
4.3.6.1. Coordonnées factoriels des variables.....	107
4.3.6.2. Contribution relatives des variables à l'inertie des axes.....	108
4.3.6.3. Qualités des représentations des variables (cosinus carrés).....	109
4.3.6.4. Représentation des cercles de corrélations	110
4.3.7. Etude des individus	113
4.3.7.1. Coordonnées factoriels des individus	113
4.3.7.2. Contribution relatives des individus à l'inertie des axes	115
4.3.7.3. Qualités des représentations des individus (cosinus carrés)	116
4.3.7.4. Projection des individus dans les plans factoriels.....	118
4.3.8. Lien entre les deux études	120
Conclusion.....	123

Conclusion générale

Références bibliographiques

Annexes

Figure 1.1 : Réservoir surélevé de 1500 m ³ à Boumerdes (Algérie)	2
Figure 1.2 : Vue générale du réservoir sis à Seikh Oumedour	2
Figure 1.3 : Vue générale du réservoir sis à Dar El Beida	3
Figure 1.4 : Réservoir circulaire posé au sol en béton armé	3
Figure 1.5 : Réservoir circulaire semi enterré en béton armé	4
Figure 1.6 : Analyse hydrodynamique à deux degrés de liberté selon Housner	8
Figure 1.7 : Scénario de vieillissement perte de résistance de la ceinture	10
Figure 1.8 : Cartographie du noyau central RDC.....	11
Figure 1.9 : Photo noyau central RDC	11
Figure 1.10 : Courbe de capacité donnée par le pushover (V-Sd)	12
Figure 1.11 : Situation du point de performance.....	13
Figure 1.12 : Déplacement inter étage	13
Figure 1.13 : Etat-Limite de glissement dans les barrages poids	15
Figure 1.14 : Evaluation de la performance d'une digue fluviale à étanchéité amont, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne	19
Figure 1.15 : Performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne..	20
Figure 1.16 : Démarche d'aide à l'expertise basée sur la capitalisation de la connaissance experte et du retour d'expérience	23
Figure 1.17 : Proportions des défauts apparents dans le parc expertisé	29
 Figure 2. 1 : Organigramme de la méthodologie d'évaluation des réservoirs	 38
Figure 2.2 : Carte du zonage de neige d'Algéri	42
Figure 2.3 : Carte du zonage de vent d'Algérie	42
Figure 2.4 : Vue générale du réservoir de Mouldiouane village N°2.....	53
Figure 2.5 : Fut de l'étanchéité détérioré.....	54
Figure 2.6 : Présence des terres et de la mauvaise herbe sur la toiture	54
Figure 2.7 : Fuite et suintement sur la paroi de l'ouvrage.....	55
Figure 2.8 : Efflorescence sur la paroi de l'ouvrage	55
Figure 2.9 : Vannes dégradées et mal entretenue	55
Figure 2.10 : Chambre de vannes inondée.....	55
Figure 2.11 : Accès dans la chambre des vannes non sécurisé et absence d'échelle pour l'accès à la coupole.....	56
Figure 2.12 : Eclatement du béton.....	56
Figure 2.13 : Défaut d'enrobage des aciers avec perte de section et de résistance	56

Figure 2.14 : Aciers dénudés et corrodés	57
Figure 2.15 : Fissures et fuites au niveau de la paroi	57
Figure 3.1 : Espace des individus	65
Figure 3.2 : Espace des variables	65
Figure 3.3 : Nuage des individus.....	66
Figure 3.4 : Nuage des variables	68
Figure 3.5 : Représentation du nuage à deux dimensions	68
Figure 3.6 : Représentation du nuage à trois dimensions.....	68
Figure 3.7 : Représentation de G dans le repère $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$	71
Figure 3.8 : Représentation variables centrées dans le repère $(G, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$	72
Figure 3.9 : Construction d'un espace factoriel.....	74
Figure 3.10 : Ajustement d'un individu i	74
Figure 3.11 : Représentation des individus dans les nouveaux axes.....	81
Figure 3.12: Cercle de corrélation	85
Figure 4.1 : Diagrammes des Valeurs propres	107
Figure 4.2 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1et 2)	111
Figure 4.3 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1et 3)	112
Figure 4.4 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1et 2)	118
Figure 4.5 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1et 3)	119
Figure 4.6 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1et 2).....	120
Figure 4.7 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1et 3).....	122

Tableau 1.1: Grille d'analyse qualitative des symptômes.....	17
Tableau 1.2 : Grille d'analyse qualitative des phénomènes	17
Tableau 1.3 : Grille d'analyse qualitative des fonctions	17
Tableau 1.4 : Grille d'analyse qualitative de la gravité de la défaillance de la fonction	18
Tableau 1.5 : Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie	24
Tableau 1.6 : Classes de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux, ajustés à partir des endommagements observés	24
Tableau 1.7 : Notes élémentaires (K_i) et les pondérations (W_i) pour chaque paramètre ..	25
Tableau 1.8 : Classification des réservoirs en fonction de leurs indice de vulnérabilité « I_v »	26
Tableau 1.9 : Classification des paramètres et leur coefficient K_i	27
Tableau 1.10: Représentation type d'un tableau A.C.P.....	31
 Tableau 2.1 : Liste des paramètres d'analyse.....	 38
Tableau 2.2: Notes élémentaires de l'implantation de l'ouvrage.....	40
Tableau 2.3 : Coefficients de pondération en fonction de la situation géographique	40
Tableau 2.4 : Notes élémentaires de la zone sismique	41
Tableau 2.5 : Coefficients de pondération en fonction du site de l'ouvrage.....	41
Tableau 2.6: Notes élémentaires en fonction des conditions du terrain.....	41
Tableau 2.7 : Coefficients de pondération en fonction des effets de site	42
Tableau 2.8 : Notes élémentaires en fonction du zonage de neige	43
Tableau 2.9 : Coefficients de pondération en fonction de la forme de la toiture	43
Tableau 2.10 : Notes élémentaires de l'action du vent	43
Tableau 2.11 : Notes élémentaires en fonction du type de structure.....	45
Tableau 2.12 : Coefficients de pondération en fonction du type de matériaux.....	45
Tableau 2.13 : Notes élémentaire en fonction du type de fondations	45
Tableau 2.14 : Coefficients de pondération en fonction des tassements de la fondation.....	46
Tableau 2.15 : Notes élémentaires en fonction du mode d'étanchéité de la paroi.....	46
Tableau 2.16 : Coefficient de pondération en fonction de l'état de l'étanchéité	46
Tableau 2.17 : Notes élémentaires en fonction du type d'étanchéité de la couverture	47
Tableau 2.18 : Pondération en fonction du degré de satisfaction de l'étanchéité	47

Tableau 2.19 : Notes élémentaires en fonction de l'indice de gravité du défaut	48
Tableau 2.20 : Coefficients de pondération en fonction de l'âge de l'ouvrage	48
Tableau 2.21 : Notes élémentaires du rôle de réservoir	48
Tableau 2.22 : Pondération en fonction de l'état de l'accessibilité pour entretien	48
Tableau 2.23 : Notes élémentaires en fonction de l'importance de l'ouvrage	49
Tableau 2.24 : Pondération en fonction de la capacité de stockage du réservoir.....	50
Tableau 2.25 : Notes élémentaires en fonction de la fréquence d'entretien du réservoir	50
Tableau 2.26 : Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre.....	50
Tableau 2.27 : Classification d'un réservoir en fonction de son « Iv ».....	51
Tableau 2.28 : Présentation des réservoirs expertisés	51
Tableau 2.29 : Indice de vulnérabilité au jour de la mise en service en 2010	53
Tableau 2.30 : Calcul de l'indice de vulnérabilité au jour de l'inspection en mars 2014.....	57
Tableau 2.31 : Présentation de l'indice de vulnérabilité des réservoirs expertisés	59
 Tableau 3.1 : Représentation type d'un tableau A.C.P	 64
 Tableau 4.1 : Données brutes (n x p)	 88
Tableau 4.2 : Tableau traité par StatBox.....	90
Tableau 4.3 : Matrice de corrélation	93
Tableau 4.4 : Nouveau tableau de données ACP	94
Tableau 4.5 : Matrice de corrélation	95
Tableau 4.6 : Tableau de données finales	96
Tableau 4.7 : Matrice de corrélation finale	98
Tableau 4.8 : Table de Bravais-Pearson (Dagnelie, 2011).....	99
Tableau 4.9 : Moyenne et écarts types des variables	101
Tableau 4.10 : Matrice des données centrées.....	101
Tableau 4.11 : Matrice des données centrées réduites	103
Tableau 4.12 : Vecteurs propres.....	105
Tableau 4.13 : Valeurs propres et leur variance associé	106
Tableau 4.14 : Coordonnées factoriels des variables	108
Tableau 4.15 : Contribution des variables.....	108
Tableau 4.16 : Qualités des représentations des variables	109
Tableau 4.17 : Coordonnées factoriels des individus.....	113
Tableau 4.18 : Contribution des variables.....	115

Tableau 4.19 : Qualités des représentations des individus.....	116
Tableau 4.20 : Contribution des variables à la formation de l'axe	121

Introduction Générale

Le parc algérien de réservoirs de stockage d'eau potable compte près de 40 000 réservoirs et est majoritairement construit en béton (Hammoum et *al*, 2010). Le retour d'expérience de près d'un demi-siècle de gestion a mis en évidence une grande disparité du comportement de ces ouvrages, qui se manifeste par plusieurs pathologies. Le manque d'entretien de ces réservoirs, directement exposés aux menaces naturelles amène une accélération du phénomène de vieillissement. Le diagnostic et l'expertise de ces réservoirs ayant des pathologies diverses sont des tâches complexes.

Un ingénieur expérimenté peut dès la première visite connaître l'origine probable du problème, mais pour un autre moins expérimenté la même tâche peut devenir difficile. Le diagnostic reste toujours un exercice dont le niveau de difficulté est très relatif. Devant le même problème exposé, les solutions proposées par les experts ne sont pas évidemment uniques. Chaque expert interprète le problème selon ses propres connaissances, car il n'existe pas une loi dite de diagnostic, mais il y a un savoir faire pour le diagnostic. C'est ainsi que (Hammoum, 2012) s'est intéressé à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton à certains aléas naturels (séisme, neige et vent...etc.), par la détermination d'un indice « I_v », en faisant intervenir 13 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 multivariée, permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus ; ce qui consiste à chercher de nouveaux axes vecteurs propres correspondant aux valeurs propres ordonnées du tableau croisant les individus (réservoirs) et les variables quantitatives (paramètres).

Dans le cadre de cette étude, et pour appliquer la méthode ACP, nous considérons un tableau de données rectangulaires avec des individus (réservoirs) en lignes et des variables quantitatives (paramètres) en colonne. Ainsi, pour démontrer l'efficacité de l'ACP, nous avons procédé à l'expertise d'un parc de 54 réservoirs dans différentes daïra (Larbaa Nath Irathen, Draa Ben Khdda, Mekla) de la wilaya de Tizi Ouzou. 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 (Bouhadoun et *al*, 2011) sont renseignées lors de différentes missions de terrain effectuées durant les années 2013, 2014.

Ainsi, ce travail de recherche est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les méthodes de diagnostic et d'analyse de risques utilisées dans le domaine de génie civil, à savoir les méthodes physiques, les méthodes par sureté de fonctionnement, les méthodes par expertise et enfin méthodes statistiques en mettant l'accent sur la méthode ACP. L'étude de la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques et plus particulièrement les réservoirs de stockage d'eau a fait l'objet de notre intérêt principal.

Le deuxième chapitre est consacré à l'exposé de la méthode d'expertise développée par (Hammoum et *al*, 2012) pour l'évaluation de l'indice de vulnérabilité des réservoirs de stockage en béton. Cette méthode est appliquée à l'échelle du parc que nous avons expertisé et une étude de cas est exposée.

Le chapitre trois présente la méthode ACP ; à savoir l'historique de la méthode, ses champs d'application, les logiciels utilisés ainsi que les différentes étapes de calcul et l'interprétation des résultats d'une ACP simple et d'une ACP normée.

Le quatrième et dernier chapitre est dédié à l'application de la méthode ACP au parc de réservoirs expertisés. Pour traiter le tableau de données obtenues, constituées de réservoirs en lignes et de paramètres en colonnes, nous faisons appel au logiciel Stat Box[®] qui est mis à notre disposition par le département d'Agronomie de l'UMMTO. Ce logiciel est un outil d'analyse et de traitement statistique compilé sous Excel[®] (annexe 2). Les résultats donnés par Stat Box[®] sont placés dans des feuilles Excel[®]. Les graphiques et les mapping sont modifiables avec les outils de dessin d'Excel[®].

Une conclusion générale achèvera notre étude en essayant de dégager les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

Introduction

Les réservoirs de stockage sont considérés comme des ouvrages d'art hydrauliques et occupent une place très particulière parmi les constructions. Le comportement mécanique hyperstatique de ces ouvrages et le comportement particulier à l'effet hydrodynamique font d'eux des structures complexes.

L'implantation des réservoirs obéit à des considérations hydrauliques liées à la pression de service souhaitée dont la solution est obtenue par un compromis avec les contraintes topographiques. Il vient alors que les sites privilégiés pour cette implantation sont des sommets de collines et de monticules ; afin d'assurer la charge nécessaire aux abonnés. C'est pour cette raison, que les réservoirs sont soumis à des conditions très rudes. Parmi ces conditions, nous avons les catastrophes naturelles telles que la neige, le vent et aussi les tremblements de terre qui sont les plus terrifiants et les plus destructifs. Ces ouvrages subissent aussi de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période de vie, ainsi que l'effet hydrodynamique suite à une excitation sismique. De ce fait, on constate que les réservoirs sont soumis à un régime sévère qui demande un soin particulier apporté à leur conception, lors de la phase étude.

L'évaluation de la vulnérabilité est une approche intéressante pour la lutte contre le vieillissement et la dégradation des réservoirs. Elle représente un élément clé dans les stratégies de prévention, voir de réduction du risque. Elle permet de disposer d'un outil d'aide à la décision dans le cadre de calcul et de leur réalisation. C'est alors, que nous consacrons ce premier chapitre à la définition de la vulnérabilité d'une structure vis à vis de certains aléas naturels (neige, vent, séisme...etc.) et à une synthèse de travaux qui ont été réalisés et traitant de la question.

1.1. Généralités sur les réservoirs

On peut classer les réservoirs selon leur position par rapport au sol en deux types ; à savoir le réservoir surélevé et le réservoir au sol. Lorsque la topographie permet de disposer d'un point haut, on construit un réservoir au sol. En revanche, lorsque le terrain ne présente pas de point suffisamment élevé, on opte pour un réservoir surélevé.

Les réservoirs peuvent être munis d'une couverture en coupole ou en dalle plate. La forme en plan peut être quelconque. Cependant la plupart du temps, les petits réservoirs se font carrés ou rectangulaires, mais la forme circulaire est la moins coûteuse. Lorsque les

moyens d'exécution le permettent, on réalise des réservoirs de forme tronconique et cylindro-tronconique à la place de réservoirs cylindriques de grand volume.

Les réservoirs peuvent être réalisés en maçonnerie ou en acier pour de petites capacités. De nos jours, la plupart des réservoirs sont réalisés en béton armé ou en béton précontraint.

a. Réservoirs surélevé

Dans la mesure du possible, ces réservoirs sont placés en altitude pour fournir passivement de la pression à l'utilisateur final. Le remplissage du réservoir se fait par une pompe d'alimentation de façon automatique, afin de maintenir un niveau constant à l'intérieur de celui-ci. De plus, une grande hauteur de réservoir pénalise la phase de production mais favorise la phase de distribution de l'eau. Ces réservoirs peuvent être soit sur une tour (figure 1.1), soit sur des pylônes de grande hauteur (châteaux d'eau) (figure 1.2) ou sur un bâtiment (figure 1.3).



Figure 1.1 : Réservoir surélevé de 1500 m³ à Benrahmoune (Boumerdes) (Boukais, 2012).



Figure 1.2 : Vue générale du réservoir sis à Seikh Oumedour (Slimani, 2013).



Figure 1.3 : Vue générale du réservoir sis à Dar El Beida (Hamitouche, 2012).

b. Réservoirs au sol

Ces réservoirs peuvent être posés au sol (figure 1.4.), semi enterrés (Figure 1.5) ou entièrement enterrés.

Pour les réservoirs posés au sol (ou très peu enterré), le radier est toujours placé au contact du sol sur un béton maigre de 5 à 10cm d'épaisseur (Hammoum, 2012).



Figure 1.4 : Réservoir circulaire posé au sol en béton armé (Hammoum, 2012).



Figure 1.5 : Réservoir circulaire semi enterré en béton armé (Hammoum, 2012).

1.2. Etude de la vulnérabilité

La vulnérabilité traduit la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter les effets provoqués par l'aléa. Elle est caractéristique du système à un moment donné et est modulable et évolutive. Le seuil de vulnérabilité à certains aléas naturels (neige, vent, séisme...ect) sera considéré comme étant le niveau moyen de dégradation à un temps donné d'un réservoir de stockage.

Les études de vulnérabilité ne sont pas uniquement réalisées sur des bâtiments habitables mais également sur les ponts, les routes, les installations industrielles, les réseaux de distribution d'eau et de gaz, les réseaux électriques, ...etc.

On caractérise la vulnérabilité par un indice lié à la géométrie de l'ouvrage (dimensions, hauteur, forme en plan, caractéristiques architecturales), à l'âge et aux matériaux de la construction. Cette notion de vulnérabilité inclut l'importance des structures en termes de coût, mais aussi de vies humaines menacées.

Pour la clarté de ce qui suit, il convient de donner ici la définition de quelques notions fondamentales.

❖ Aléa

L'aléa est la probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

❖ Risque

Le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.

Le risque attaché à un danger est donc évalué par une fonction à deux variables. Pour l'obtenir, on recherche :

- 1) une mesure de l'occurrence d'un danger (une défaillance dans l'industrie, un état-limite en génie civil).
- 2) une estimation des effets ou conséquences du danger s'il se produisait. Cette estimation correspond généralement à un coût humain, économique ou environnemental (nombre de morts, coût économique...),

Le risque est souvent exprimé par la multiplication de ces deux quantités.

$$\text{Risque} = \text{Alea} \times \text{Vulnérabilité}$$

❖ Prévention

La seule façon efficace de se protéger contre les catastrophes naturelles reste la prévention. Elle concerne les actions à mener, de manière à diminuer l'impact de ces derniers sur les pertes humaines et aussi sur le plan économique. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'aléa découle des contraintes de notre environnement naturel et ne peut être modifié. Le rôle de l'ingénieur est de fournir des procédés de construction ou de réhabilitation qui permettent de réduire la vulnérabilité des nouvelles constructions ainsi que du bâti existant.

1.3. Analyse de risques par l'estimation de la vulnérabilité des structures

La prévention des risques a toujours été une préoccupation essentielle des ingénieurs du génie civil, que ce soit lors de la conception des ouvrages, de leur construction, ou de leur exploitation. Ce souci permet d'obtenir des ouvrages fiables, disponibles, sécuritaires..., bref des ouvrages sûrs, et pourtant cela n'a pas été formalisé par les concepts de l'analyse de risques. Ainsi, des générations d'ingénieurs du génie civil ont fait et font de l'analyse de risques sans utiliser nécessairement le cadre et les termes qui ont été consacrés dans le contexte industriel et appliqués en Sécurité de Fonctionnement.

L'activité du génie civil se positionne prioritairement dans le cycle de vie de l'exploitation d'ouvrages existants plutôt que dans celui de la conception et la construction d'ouvrages neufs. Les préoccupations des ingénieurs du génie civil se concentrent ainsi largement sur l'optimisation de la maintenance et l'augmentation de la durabilité. Ensuite, la pression croissante de la société, confrontée aux risques naturels et technologiques, induit

une demande forte de transparence et d'affichage des risques. Par conséquent, on constate une volonté nette de la communauté scientifique du génie civil de se positionner dans le domaine de l'analyse de risques.

Certains secteurs du génie civil présentent plus d'avance que d'autres. Ainsi, la Sûreté de Fonctionnement, à partir d'approches déterministes ou fiabilistes, est pratiquée depuis de nombreuses années dans le génie civil du nucléaire et de l'offshore. Par ailleurs, on tend à analyser à partir des statistiques les ouvrages à grand linéaire, tels que les réseaux enterrés ou les routes. En revanche, en génie civil traditionnel (ouvrages d'art, bâtiment... et de façon générale pour les ouvrages rentrant dans le champ d'application des Eurocodes), on privilégie les approches physiques et expertes de l'analyse des risques.

Le domaine particulier des barrages dans le génie civil est intéressant, car il sollicite la mise en œuvre de tout l'éventail d'approches de l'analyse de risques. Les modèles physiques sont déployés pour la connaissance fine des mécanismes. Les modèles statistiques sont utilisés en analyse des données d'auscultation. L'expertise est largement mise à contribution en analyse préliminaire et en synthèse d'études approfondies. Enfin, la Sûreté de Fonctionnement appliquée aux barrages est actuellement en plein développement.

1.4. Différentes approches pour l'analyse des risques

De nombreux gestionnaires de parcs d'ouvrages et d'autres organismes ont développé différentes méthodes pour évaluer les ouvrages de génie civil à des fins de diagnostic, d'analyse des risques et de programmation d'actions de maintenances. Ces méthodes peuvent être groupées en deux familles: les **méthodes internes** et les **méthodes externes** d'analyse de risques (Talon et al, 2009), (Zwingelstein, 1996). Pour chacune de ces familles de méthodes, nous citons les applications remarquables en génie civil.

1.4.1. Méthodes internes

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**.

1.4.1.1. Approche par modèles physiques

Cette approche repose sur la modélisation physique des processus continus ou discrets de dégradation du système, en prenant en compte les équations régissant les phénomènes internes. Elle implique une connaissance approfondie du système et sa représentation sous la forme de modèles physiques et mathématiques, appuyés par la simulation numérique.

La modélisation physique constitue l'approche privilégiée de l'analyse de risques dans le génie civil traditionnel. Elle s'intéresse aux mécanismes et aux lois de comportement des matériaux et des structures. Ces dernières années, elle connaît des développements importants dans le domaine du calcul numérique : éléments finis, éléments discrets. La modélisation physique permet d'apprécier la sécurité d'un ouvrage vis-à-vis d'un phénomène préjudiciable ou de prévoir l'évolution d'un comportement. Parmi les modèles physiques nous avons les modèles d'états-limites (intervenant dans les méthodes aux états-limites).

➤ Les méthodes aux états-limites

Les modèles d'états-limites s'attachent à représenter soit les pertes de fonctionnalité d'un ouvrage (les états-limites de service), soit les modes de ruine ou les pertes d'équilibre statique (les états-limites ultimes). Ainsi, il permet d'apprécier la sécurité de l'ouvrage en déterminant les critères de stabilité liés aux états limites dans les conditions réelles d'exploitation. Dans l'approche déterministe, le projeteur s'attache à vérifier que les contraintes développées dans la structure restent inférieures aux contraintes admissibles du matériau ou de la structure (Hammoum, 2012).

Dans le domaine des réservoirs de stockage des fluides, le modèle le plus connu est celui de Housner. D'après l'Eurocode 8 (partie 4 : consacrée aux réservoirs), la stabilité d'ensemble du réservoir vis-à-vis de l'effondrement doit être satisfaite, sous l'effet de l'action sismique à l'ELU. La stabilité d'ensemble se rapportant à un comportement de corps rigide peut être perdue par glissement ou renversement. Il y'a lieu de considérer la somme des deux moments de renversement (d'impulsion et d'oscillation). Quant à la vérification au glissement, nous considérons la somme de la force d'impulsion et de la force d'oscillation comme résultante des forces horizontales.

A titre d'illustration, la figure 1.6 qui suit présente la modélisation d'un réservoir surélevé sollicité au séisme, tenant compte de l'effet hydrodynamique. Ouvrage particulièrement vulnérable à ce genre de sollicitation.

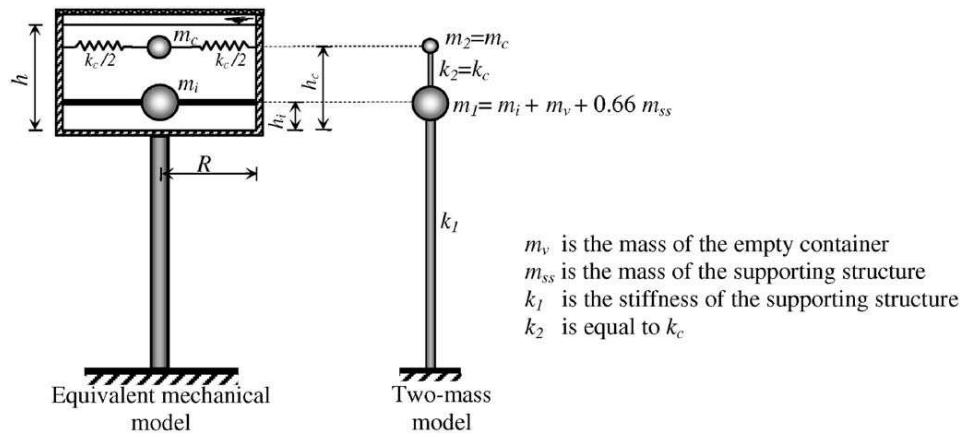


Figure 1.6 : Analyse hydrodynamique à deux degrés de liberté selon Housner (Livaoglu et al, 2006).

- Pour étudier l'action du liquide sur les parois du réservoir, (Hammoum et al, 2010) ont utilisé l'approche développée par Housner (Housner, 1963), dans laquelle l'action du liquide est décomposée en une action passive provoquant des efforts d'impulsion et une action active provoquant des efforts d'oscillation.

Les calculs menés par (Hammoum et al, 2010), ont mis en évidence deux phénomènes lors d'une excitation sismique :

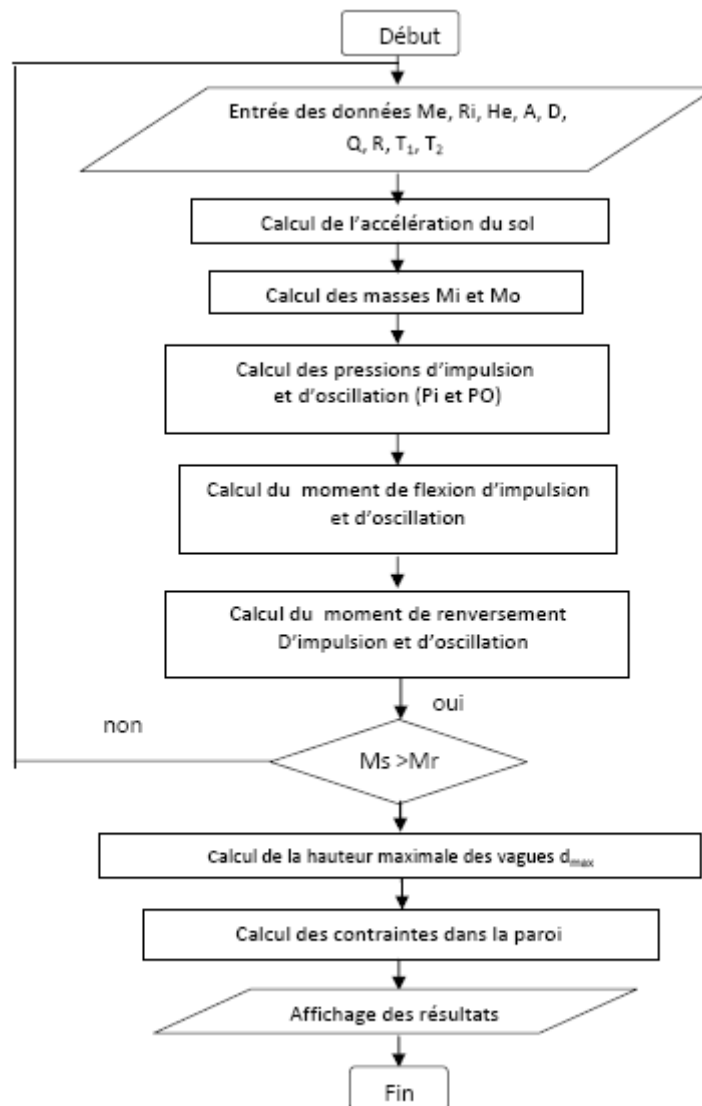
- une surtension (contraintes de traction horizontales) des bandes de la paroi circulaire, laquelle provoquerait une fissuration verticale dans la bande, si elle n'est pas absorbée par des armatures horizontales (cerces) suffisantes.
- l'apparition de contraintes de traction verticales dans la paroi, qui provoqueraient des fissurations horizontales, si elles ne sont pas absorbées par des armatures verticales (de construction ou de répartition) suffisantes.

Ces deux phénomènes agissant simultanément, provoquent des fissures inclinées, laissant paraître des suintements qui se manifestent par la présence d'humidité parfois chargée en sels après percolation à travers le béton.

Ainsi, (Hammoum et al, 2010) ont montré que la négligence ou l'omission du phénomène hydrodynamique sous estimait considérablement les contraintes de traction (horizontales et verticales) agissant dans la paroi. Cette négligence est la cause principale de l'apparition des fissures obliques sur la paroi du réservoir, localisées à la liaison paroi-radier ; compromettant ainsi l'étanchéité de l'ouvrage. Ces fissurations constituent une pathologie très largement observée sur des réservoirs actuellement en service en Algérie, particulièrement en zone IIb (moyenne sismicité) et zone III (forte sismicité).

L'étude hydrodynamique approchée par la méthode analytique de Housner, souvent méconnue par les ingénieurs civils de bureaux d'études, s'y prête bien à la programmation. Aussi un programme de calcul informatique a été développé sur un classeur Excel. Son organigramme est présenté ci-dessous :

Organigramme de l'étude hydrodynamique approchée par la méthode de Housner (Hammoum et al, 2010).



- En utilisant le modèle des états limites, (Hammoum et al, 2012) ont mis en évidence l'origine du scénario de vieillissement qui a provoqué la rupture de la ceinture supérieure et du radier de deux réservoirs jumelés en béton destinés à l'alimentation en eau potable de la wilaya de Jijel.

En enchainant les séquences chronologiques de défaillance (figure 1.7), (Hammoum et al, 2012) ont constaté que l'espace au dessus des coupoles de couverture qui a été transformé en aire de stationnement des véhicules lourds est source des mécanismes

physiques se produisant au sein du système et conduisant à des pertes ou dégradations de fonctions.

Les surcharges au dessus de la coupole peuvent provoquer des surtensions au niveau de la ceinture supérieure. Les surtensions peuvent entraîner à leur tour une épaufrure du béton, qui aura pour effet de dénuder les aciers. Ces aciers dénudés laissés à l'air libre marin agressif finiront à long terme par se corroder. Cette corrosion induira une diminution de la section des aciers. Le facteur de sécurité pris en compte dans les calculs de dimensionnement, s'en trouve ainsi réduit ; ce qui aboutit à la perte de fonction de cette ceinture supérieure. Les oxydes de fer forment autour des armatures une gaine qui, à partir d'une certaine importance, peut diminuer leur adhérence au béton. Cette perte d'entraînement des barres conduit alors à une perte générale de la résistance de la ceinture. La mobilisation des efforts par les barres en traction de la ceinture supérieure peut être modifiée par un glissement relatif de l'ancrage lors de sollicitations, la mobilisation des efforts se fait alors avec de plus grandes déformations. En définitive, la conséquence de la corrosion des armatures du béton armé est l'affaiblissement et l'appauvrissement des capacités portantes de la ceinture supérieure. Ce scénario de vieillissement peut être illustré par le diagramme de la (figure 1.7).

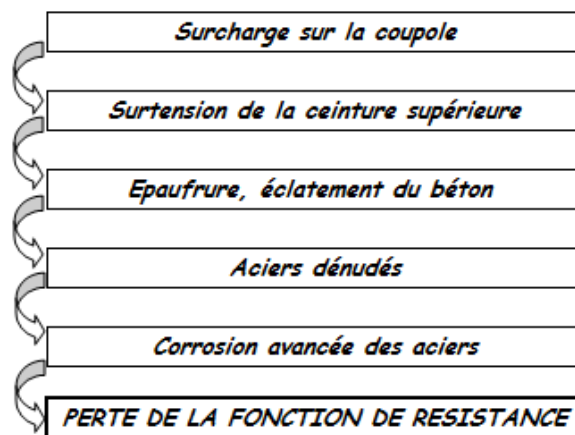


Figure 1.7 : Scénario de vieillissement perte de résistance de la ceinture (Hammoum et al, 2012).

C'est ainsi que (Hammoum et al, 2012) ont procédé à la vérification des contraintes; dans les différents éléments des réservoirs ; engendrées par les véhicules stationnant au dessus des coupoles. A travers leurs calculs, ils ont pu démontrer que l'origine des désordres est la surcharge au dessus des coupoles. Ils avaient mis en évidence que la négligence humaine ou l'ignorance des agents de gestion de ce patrimoine a provoqué, sans se douter, les désordres irréparables de ces ouvrages, ayant coûté à l'entreprise de gestion une

perturbation dans la distribution en eau potable, une gêne des abonnés dans leur planning de distribution et enfin une facture importante en investissement pour la reconstruction de réservoirs neufs, en remplacement des anciens.

- **(Hamitouche, 2012)** a mené une analyse linéaire d'un immeuble surmonté d'un réservoir implanté à Dar El Beida en zone sismique en le modélisant par la méthode des éléments fini et en utilisant le code du calcul Robot[®]. Il a remarqué que le séisme de 2003 qui a endommagé la structure lui a fait subir une augmentation des contraintes dans le noyau central allant jusqu'à presque un quart (1/4) de la valeur qu'elle aurait subi sous le séisme de 1988. Ainsi, il a pu mettre en évidence les causes des dommages enregistrés sur le noyau central du réservoir surélevé, occasionné par le séisme de 2003 de Boumerdès. Un des résultats mis en évidence, dans cette étude, est que la cartographie des fissures obtenue par simulation numérique (cas de réservoir plein) sous le spectre de réponse 2003 (figure 1.8), reproduit fidèlement les fissures rencontrées sur le terrain (figure 1.9), ce qui démontre que le réservoir était bien rempli au moment du séisme de 2003.

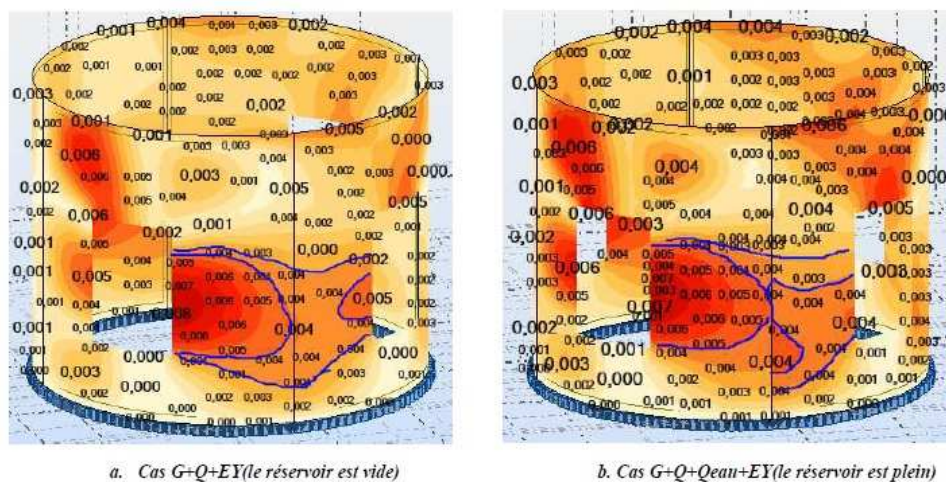


Figure 1.8 : Cartographie du noyau central RDC (Hamitouche, 2012.)



Figure 1.9 : Photo noyau central RDC (Hamitouche, 2012).

Aussi, dans son étude, (Hamitouche, 2012) propose un programme de réhabilitation et de renforcement permettant, après calcul la réduction des contraintes de 25 % de la valeur qu'elle a subit sous le séisme du 21 mai 2003. Ceci permet également de réduire la période de l'ouvrage de 1,46 secondes à 1,36 secondes.

- **(Ait L'hadj, 2013)**, faisant suite aux travaux menées par (Hamitouche, 2012), a effectué une analyse non linéaire dite « pushover » du même immeuble réservoir expertisé en utilisant le logiciel de calcul « ETABS »[®], afin de déterminer son comportement dans le domaine non linéaire et d'évaluer sa performance sismique.

Au terme de son analyse non linéaire, Ait L'hadj a procédé au tracé de la courbe de capacité (figure 1.10), du point de performance (figure 1.11), des déplacements relatifs inter étages (figure 1.12) et de la demande en ductilité (μ_D) qui caractérise le degré de pénétration du bâtiment dans le domaine plastique. Elle a également déterminé la distribution des rotules plastiques dans les différents éléments structuraux poutres, poteaux et noyau central ainsi que leurs niveaux de dommages correspondant au point de performance.

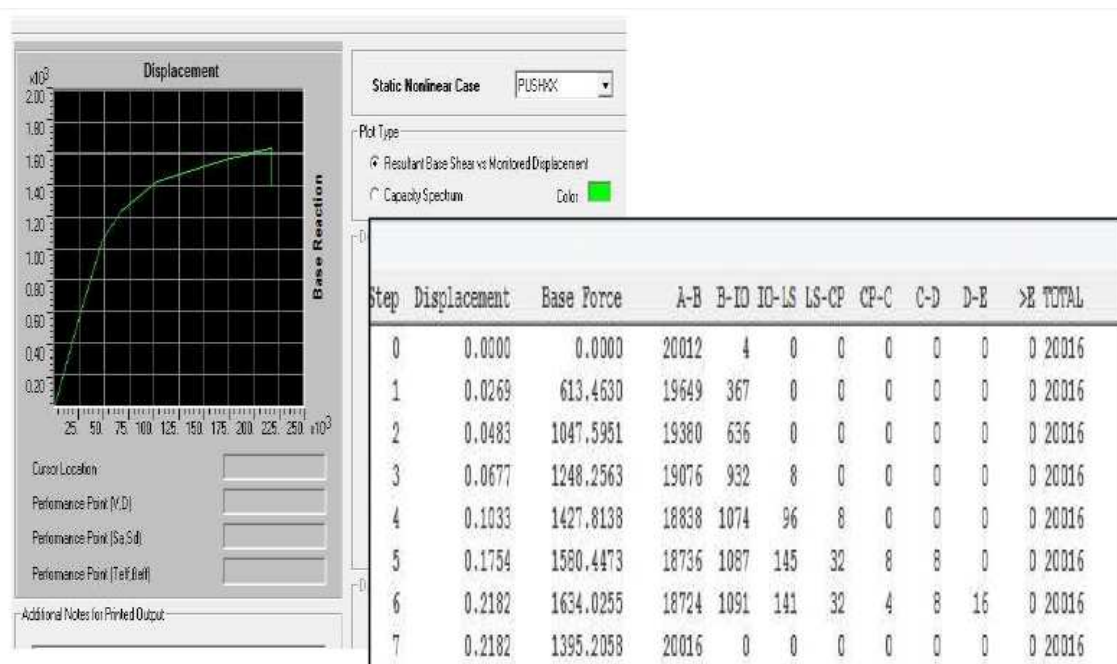


Figure 1.10 : Courbe de capacité donnée par le pushover (V-Sd) (Ait L'hadj, 2013).

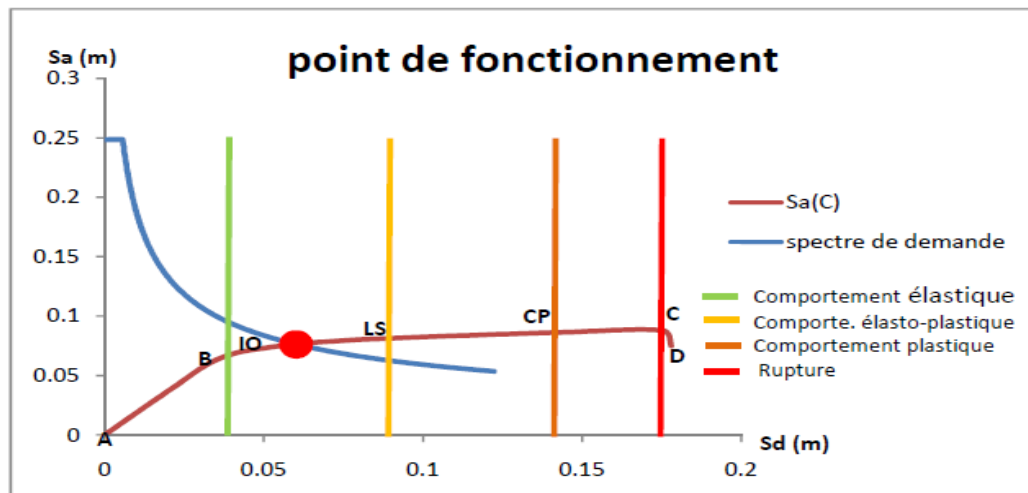


Figure 1.11 : Situation du point de performance (Ait L'hadj, 2013).

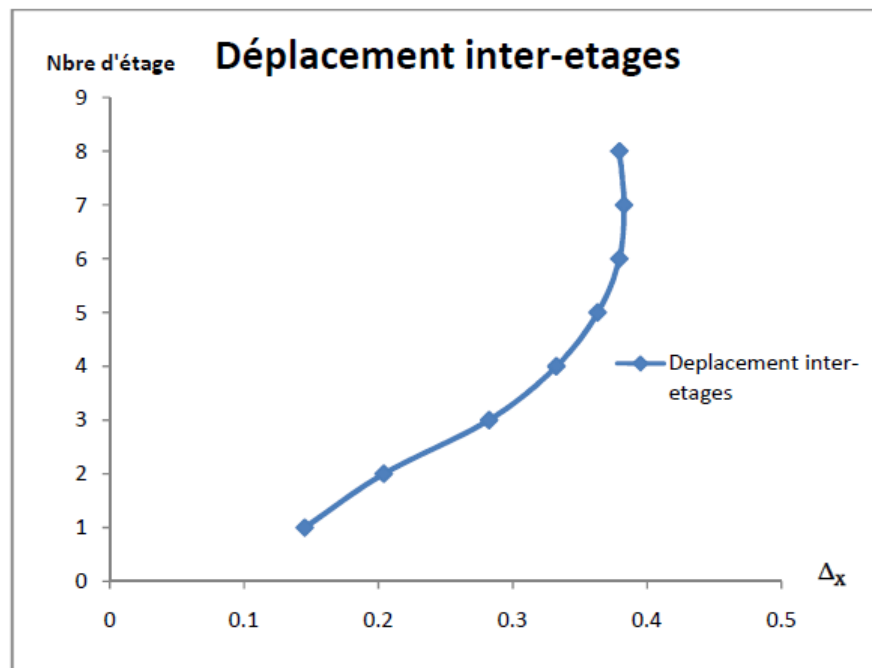


Figure 1.12 : Déplacement inter étage (Ait L'hadj, 2013).

Après l'analyse de ses résultats, Ait L'hadj a constaté que le point de performance de la structure est estimé à un amortissement égal à 17%, avec un déplacement spectral correspondant à 5,9 cm. Dans le cadre de son étude, elle a proposé une échelle du comportement de la structure comportant quatre couleurs, tels que :



Vert : définit un comportement élastique de la structure,



Orange 1 : définit un comportement élasto-plastique ;



Orange 2 : définit le comportement post plastique ;



Rouge : définit l'état limite ultime et/ou l'effondrement de la structure

En situant le point de fonctionnement sur le spectre de capacité, elle a remarqué que ce dernier est localisée dans la zone orange 1 ; qui définit un comportement plastique globale de la structure ; ce qui signifie que :

- le taux d'endommagement de cet ouvrage est de l'ordre 3 ; qui correspond à l'apparition des fissures dans quelques éléments de ce dernier.
- le taux de pénétration dans le domaine plastique est estimé à 2.83.

Ce qui a conduit Ait L'hadj à conclure que la structure pourra résister mieux si elle est implantée dans une zone sismique de faible magnitude.

- La méthode aux états-limites est aussi utilisée dans le domaine des barrages.

Les principales actions externes prises en compte dans la justification des barrages sont le poids propre, la poussée des sédiments se déposant dans la retenue, le cas échéant les actions liées à des dispositifs particuliers (tirants d'ancrages, recharge aval...), les actions variables de l'eau (les poussées hydrostatiques amont et aval, les sous-pressions) et l'action accidentelle des séismes. Les intensités des actions de l'eau sont obtenues dans les différentes configurations de remplissage de la retenue (le niveau normal d'exploitation, les plus hautes eaux correspondant à la crue de projet, la retenue vide, la vidange rapide pour les remblais). Les résistances de matériaux sont obtenues par jugement d'expert à partir de résultats d'essais sur les matériaux.

On rencontre différents états-limites dans les recommandations. Pour les barrages poids, on justifie le non glissement de l'ouvrage sur son sol d'assise, le non renversement de l'ouvrage, le non cisaillement du corps du barrage et la non traction du parement amont. Les conditions d'états-limites s'expriment à partir d'un modèle physique de l'état-limite et font intervenir un coefficient global de sécurité. La figure 1.13 montre l'exemple de la justification de l'état limite de glissement d'un barrage poids (Peyras et al, 2003).

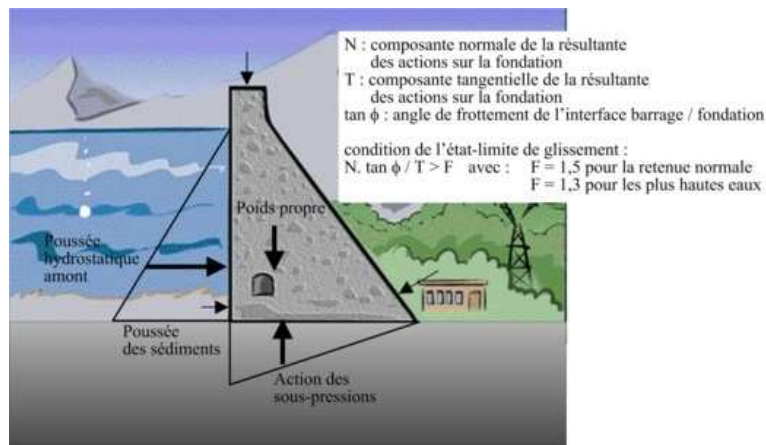


Figure 1.13 : Etat-Limite de glissement dans les barrages poids (Pyras, 2003).

1.4.1.2. La modélisation fonctionnelle par la Sûreté de Fonctionnement

La Sûreté de Fonctionnement est définie comme **la science des défaillances**. L'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un ouvrage repose sur la prévision de l'évolution de sa performance (aptitude au service, sécurité structurale, durabilité), en fonction de l'environnement et des sollicitations auxquelles il est soumis.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la vulnérabilité par modélisation fonctionnelle par sûreté fonctionnement qui diffèrent les unes des autres, et parmi ces méthodes nous avons l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE), et de leur Criticité (AMDEC). Nous citons, dans ce qui suit, l'application de cette dernière dans le domaine de génie civil.

➤ Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets (AMDE) et de leur Criticité (AMDEC)

C'est l'outil d'analyse le plus utilisé et l'un des plus efficaces parmi l'ensemble des techniques inductives disponibles. Introduite dans l'aéronautique depuis 1960, elle s'est peu à peu imposée dans le spatial, le nucléaire, la chimie, l'industrie automobile...etc. Elle commence par une description du système, de sa morphologie et de son fonctionnement. Ensuite, sont recensées les défaillances de chaque sous système ou composants.

La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillances. Un mode de défaillance est la manière par laquelle le système étudié ne va plus remplir sa fonction : à chaque fonction non remplie ou mal remplie correspond un

mode défaillance. Ceux-ci doivent être quantifiés en fonction de différents paramètres. On procède ensuite à la hiérarchisation des modes de défaillance.

Lorsque l'AMDE globale de tous les composants est terminée, une analyse d'évaluation des risques est effectuée pour toutes les défaillances précédemment identifiées. L'évaluation des risques potentiels se traduit par le calcul de la **Criticité**, à partir de l'estimation du couple indice de gravité et de fréquence (probabilité).

Cette criticité permet de :

- noter l'importance du risque engendré par chaque cause de défaillance ;
- hiérarchiser les causes entre elles afin de déterminer celles qui doivent faire l'objet d'une action corrective.

L'indice de Criticité est calculé pour chaque cause de défaillance, en effectuant le produit de deux indices : $C = F \cdot G$

Où :

- F désigne l'indice de fréquence : Il représente la probabilité que la cause de défaillance apparaisse et qu'elle entraîne le mode potentiel de défaillance considéré.
- G désigne l'indice de gravité : Il représente le niveau de conséquences provoquées par l'apparition du mode de défaillance.

Il est bon de noter que plus la probabilité est grande et plus les effets sont jugés graves, plus la criticité d'un mode de défaillance est alors plus importante et plus il devient nécessaire de prendre des mesures correctives. *La criticité est définie comme le risque de dégradation ou défaillance d'un composant.*

- **(Peyras, 2003)** a utilisé l'AMDE Produit sur les barrages, qui consiste à faire une analyse qualitative sur les trois variables (symptôme, phénomène et fonction). Il propose une grille d'analyse qualitative de l'état de chacune des variables de chaque composant du barrage.

Il détermine les attributs de **la normalité** de la variable symptôme conformément au tableau suivant :

Tableau 1.1 : Grille d'analyse qualitative des symptômes.

Attributs d'état du symptôme	Qualification
0	symptôme normal
1	symptôme légèrement en écart par rapport à l'état normal
2	symptôme en écart sensible par rapport à la normalité
3	symptôme alarmant

Puis donne les attributs d'état de ***l'ampleur*** de la variable phénomène selon la grille suivante :

Tableau 1.2 : Grille d'analyse qualitative des phénomènes.

Attributs d'état du phénomène	Qualification
0	phénomène absent ou normal
1	phénomène faible ou légèrement en écart par rapport à l'état normal
2	phénomène important
3	phénomène très important

Et enfin, donne les attributs d'état de ***la performance*** de la fonction selon la grille suivante :

Tableau 1.3 : Grille d'analyse qualitative des fonctions.

Attributs d'état de la fonction	Qualification
0	Fonction optimale
1	Fonction correcte
2	Fonction partielle
3	Fonction défaillante

Or, l'attribut d'état de la fonction ne peut être obtenu directement par des symptômes car ces derniers renseignent les phénomènes (et non pas les fonctions). Il est alors nécessaire de revenir aux causes de pertes de performance (c'est à dire les phénomènes) qui sont à l'origine de la perte de performance de la fonction. Dans cette démarche l'analyse qualitative d'une fonction à un instant d'observation T est établie en considérant :

- L'historique des « n » phénomènes à l'origine de la dégradation de la fonction, c'est-à-dire les lois d'évolution des attributs d'état des phénomènes entre l'instant initial (lors de la mise en service de l'ouvrage) et l'instant d'observation T.
- Attribut de la performance de la fonction à l'instant initiale t_0 .

Sauf que cette manière de faire présente l'inconvénient lié à la difficulté d'apprécier cette loi d'évolution en fonction du temps. Pour palier à cette difficulté, et dans le but de déterminer plus tard la criticité des conséquences de la défaillance d'un composant par la méthode de l'AMDEC, il est important de définir l'indice de gravité des effets de défaillance d'un composant. Cet indice de gravité renseigne sur la sévérité relative à l'effet de défaillance.

Pour apprécier l'indice de gravité de la défaillance de la fonction d'un composant, (Hammoum, 2012) a proposé, les attributs d'état de la gravité de la défaillance fonction du composant dans le tableau qui suit :

Tableau 1.4 : Grille d'analyse qualitative de la gravité de la défaillance de la fonction.

Attributs d'état de la gravité de défaillance de la fonction	Indice de gravité	Qualification
0	Niveau 1	Pas de désordres visibles
1	Niveau 2	Quelques défauts, composant à surveiller
2	Niveau 3	Défauts spécifiques de gravité variable
3	Niveau 4	Défauts très important et risque de ruine

- A partir des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement adaptées au génie civil (analyse fonctionnelle, arbres de défaillances et l'AMDE) ; le Cemagref (Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts), en collaboration avec l'Université Marne la-Vallée (laboratoire Génie urbain, environnement et habitat) et l'Université Blaise-Pascal (Laboratoire de génie civil), ont développé des méthodes d'évaluation de l'aptitude au service des ouvrages hydrauliques, avec des applications pour les digues fluviales et les barrages (Serre et al, 2007). Un modèle fonctionnel répondant à des besoins de méthodes d'évaluation génériques et utilisables pour des ouvrages de nature différente a été développé. La modélisation des mécanismes de vieillissement et de rupture permet de construire des indicateurs structurels représentatifs de l'état des ouvrages hydrauliques. Cette démarche scientifique a permis d'obtenir une bonne exhaustivité des

indicateurs entrant dans l'évaluation de la performance des ouvrages, en comparaison avec une démarche directe heuristique qui ne permettrait pas de tels résultats. Fondée sur l'analyse de la connaissance sur les défaillances des ouvrages hydrauliques et l'appui d'un groupe d'experts conseils, une base de règles d'évaluation des indicateurs structurels a été proposée. Ces règles intègrent l'ensemble des informations disponibles sur les ouvrages, celles issues de la connaissance physique des mécanismes, des données d'auscultation ou des inspections visuelles. La prise en compte de la connaissance heuristique des ingénieurs vient compléter la démarche systématique du modèle théorique fonctionnel, permettant ainsi d'obtenir une base de règles fondée, d'une part, sur une démarche scientifique rigoureuse, d'autre part, sur la pratique des experts du domaine.

Les indicateurs structurels des ouvrages sont agrégés au moyen d'une méthode d'analyse multicritères à base de règles d'affectation, permettant ainsi de construire un indicateur de performance pour chaque mécanisme. Des tests de validation sur des ouvrages réels sont effectués pour s'assurer de la pertinence et de la validité des résultats obtenus pour l'évaluation de la performance des ouvrages (figure 1.14 et 1.15). Les analyses de sensibilité montrent une bonne concordance entre la méthode à base d'indicateurs et des diagnostics traditionnels. Toutefois, ces tests doivent être poursuivis sur de nombreux ouvrages afin de rajouter ou de modifier des règles d'affectation pour augmenter la précision de la méthode à base d'indicateurs.

Cote maximale des indicateurs structurels :	Indicateur de performance : infiltration d'eau dans le corps de digue	Cote de performance de la fonction d'étanchéité de la recharge amont										
		10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
(i) présence de terriers												
(ii) présence de racines (végétation)												
(iii) ouvrage traversant la digue												
(iv) composition du corps de digue												
10	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
9	9	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
8	8	8	8	7	6	5	4	3	2	1	0	
7	7	7	7	7	6	5	4	3	2	1	0	
6	7	7	7	6	6	5	4	3	2	1	0	
5	6	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0	
4	6	6	6	5	4	4	3	3	2	1	0	
3	6	5	5	4	4	4	3	3	2	1	0	
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	

Figure 1.14 : Evaluation de la performance d'une digue fluviale à étanchéité amont, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (Serre, 2005).

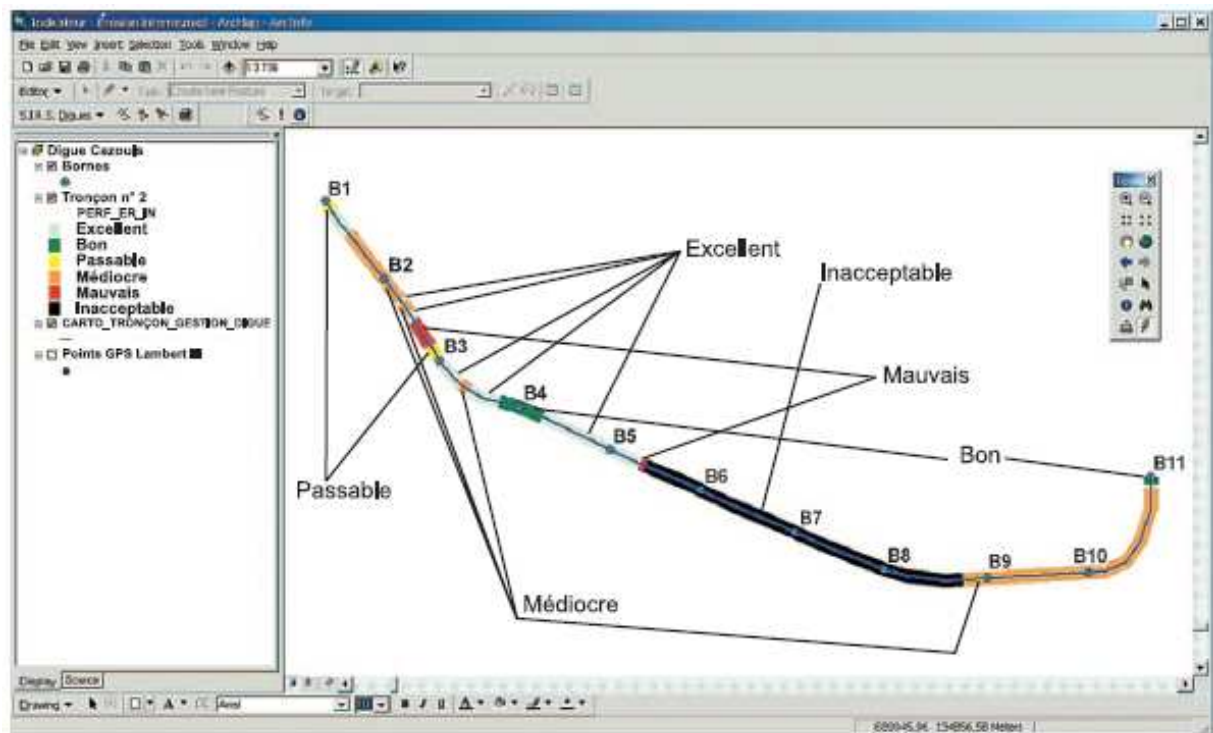


Figure 1.15 : Performance d'une digue fluviale vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (Serre et al. 2007).

La pratique révèle que la méthode à base d'indicateurs est bien admise parmi les ingénieurs spécialistes des ouvrages hydrauliques. Cet état de fait résulte de l'intégration de la démarche d'ingénierie traditionnelle aux règles d'affectation des indicateurs structurels et de performance. Un autre avantage important de cette méthode, qui est apparu à l'usage, est l'adaptabilité de la base de règles : celle-ci peut être modifiée et complétée de manière très simple. Ainsi, la méthode proposée offre une transparence, dans la mesure où toutes les règles sont énoncées et accessibles aux experts. Ce modèle a servi de base à plusieurs recherches et applications.

Dans le domaine des barrages, des bases de connaissances sur les mécanismes et les historiques de vieillissement ont été développées et sont destinées aux experts du domaine pour l'aide au diagnostic et à l'analyse de risques (Peyras et al, 2006). Dans le domaine des digues, des méthodes d'évaluation de la performance ont été proposées. Elles sont utilisées par les gestionnaires d'ouvrages et intégrées dans un système d'information géographique (Serre et al. 2006). Une nouvelle recherche, récemment engagée, vise à développer des méthodes d'aide à l'expertise pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des barrages en service (Curt et al.2006).

- Pour bien illustrer la méthode de sureté de fonctionnement (AMDEC), (Hammoum, et al, 2014) ont défini un scénario de vieillissement des réservoirs de stockage qui sont de typologie variée, hétérogène au sein d'un même parc et possèdent une documentation technique incomplète, généralement inexistante (ouvrages non documentés).

Un scénario de vieillissement est défini comme un enchainement de causes et d'effets qui conduisent à la dégradation des caractéristiques et propriétés de l'ouvrage. (Hammoum et al, 2014) ont dressé les principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton pouvant apparaître dès la mise en service de l'ouvrage. Ils ont pu répertorier sept principaux mécanismes de vieillissement des réservoirs en béton (Scénario 1, 2, ...,7) :

- scénario 1 : déformation du sol de fondation,
- scénario 2 : alcali-réaction,
- scénario 3 : corrosion des aciers,
- scénario 4 : dégradation des composants par réaction avec le milieu (vent, gel, neige),
- scénario 5 : dégradation des enduits étanche,
- scénario 6 : dégradation du revêtement d'étanchéité de couverture,
- scénario 7 : faiblesse du réservoir vis-à-vis de l'effet hydrodynamique.

Leur objectif était d'identifier toutes les fonctions du système (réservoir) en considérant chacun de ses composants, pour ensuite identifier leurs modes de défaillance, leurs causes et effets. Pour ce faire, ils ont procédé à l'analyse fonctionnelle externe qui leur ont permis d'obtenir les fonctions principales et de contrainte accomplies par le système considéré dans sa globalité. Puis l'analyse fonctionnelle interne ; qui leur ont permis de définir le rôle de chaque composant ainsi que les interactions entre ces derniers. Ceci a aboutit à la construction des Blocs Diagrammes Fonctionnels qui ont matérialisé les relations entre les composants du système et les relations entre les composants et les milieux extérieurs. A partir des blocs diagrammes fonctionnels, ils ont déterminé les fonctions de conception des composants du système.

1.4.2. Les méthodes externes

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.

1.4.2.1. Analyse des risques par expertise

On définit l'expert comme une personne disposant d'un savoir et d'un savoir-faire. Son raisonnement fait appel à ses connaissances théoriques (connaissance fine du système dont il est expert) et à la longue expérience dont il tire des précédents et son savoir-faire (Zwengelstein, 1996). Dans une approche d'analyse de risques basée sur l'expertise, l'expert adopte un raisonnement par analogie : il cherche à prévoir les évolutions futures des dégradations d'un ouvrage soumis à un mécanisme, en examinant le comportement d'ouvrages de même type déjà connus de lui. L'expert peut alors évaluer le temps nécessaire pour que de nouvelles dégradations apparaissent et les conséquences associées, puis anticiper les évolutions et définir les dispositions correctives pertinentes : réparation, confortement, mesures d'urgence...etc.

Face à un parc d'ouvrages hétérogènes ou d'ouvrages homogènes en petit nombre, dans des contextes d'ouvrages mal connus, les données disponibles sont souvent en petite quantité, incomplètes et imprécises (Hammoum, 2012). La façon la plus simple d'évaluer les évolutions des ouvrages est alors d'examiner les lois d'évolution d'ouvrages existants de même conception et ayant connu des mécanismes analogues. Quelques gestionnaires de parcs d'ouvrages hétérogènes pratiquent cette approche basée sur le retour d'expérience et appuyée par l'expertise, à l'instar de la SNCF sur son parc de tunnels en briques (Crémona, 2002).

De récents travaux ont été menés pour développer l'analyse de risques par expertise (Peyras et *al*, 2005). Ils ont consisté à construire, d'une part, des bases de connaissances sur les mécanismes, d'autre part, des bases de données d'études de cas de barrages ayant connu des dégradations. Par référence à des ouvrages de même type et soumis à des mécanismes analogues, ces bases de données sont destinées à aider les experts dans leurs missions de diagnostic et d'analyse de risques. Cette démarche d'aide à l'expertise, résumée à la figure 1.16, est donc basée sur la capitalisation de la connaissance experte et du retour d'expérience.

Ces travaux ont conduit à développer des modèles génériques, pouvant s'adapter à tous les mécanismes, permettant de représenter la connaissance experte sous forme de scénarios et d'archiver les études de cas sous forme d'historiques de vieillissement. Les bases de données de scénarios et d'historiques de vieillissement sont ensuite destinées à être manipulées au moyen d'outils informatiques d'aide à l'expertise (Peyras et *al*, 2005).

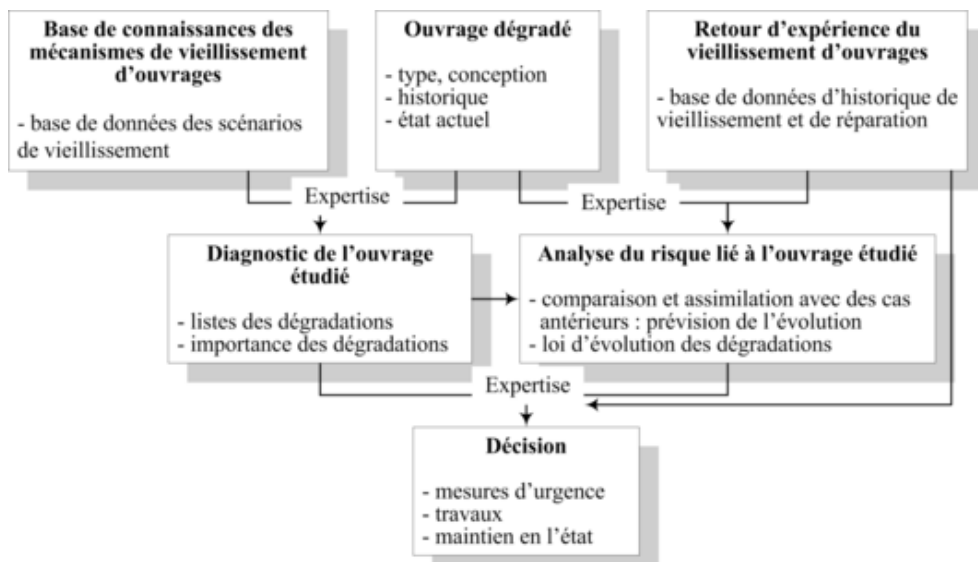


Figure 1.16 : Démarche d'aide à l'expertise basée sur la capitalisation de la connaissance experte et du retour d'expérience (Peyras et al, 2005).

En synthèse, l'analyse de risques par expertise est mise en œuvre dans les contextes où la modélisation physique ou fonctionnelle n'est pas possible (à un coût raisonnable) et où les données sont peu abondantes. L'expert est alors le seul capable de prévoir l'évolution d'un système et ses défaillances potentielles. Certains domaines du génie civil ont formalisé cette approche par le développement d'outils d'aide à l'expertise basés sur la capitalisation des connaissances experte et du retour d'expérience.

A. Méthode GNDT

En Italie, l'utilisation d'une technique d'évaluation pour assigner des indices de vulnérabilité a été proposée pour la première fois par (Benedetti et al, 1984). Cette technique a été développée par la suite par le Groupe National de Défense Contre les Tremblements de Terre (GNDT) du Conseil national de recherche de l'Italie (CNR). La méthode GNDT, maintenant largement utilisée, a permis de répertorier des milliers de bâtiments à travers l'Italie (Augusti et al, 2000). Elle a été établie en distinguant les bâtiments en maçonnerie des bâtiments en béton armé.

L'indice de vulnérabilité des bâtiments en maçonnerie se calcule, en combinant des informations descriptives (typologiques et qualitatives) et des informations quantitatives pour paramètres, décrits au tableau 1.5.

Pour chaque paramètre, on définit la classe de vulnérabilité Iv_i comprise entre A et D. la moins vulnérable est la classe A. Elle traduit la conformité de ce paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure. La plus vulnérable est la classe D. Elle traduit la situation la plus

défavorable, tandis que les classes B et C représentent des situations intermédiaires.

Tableau 1.5: Paramètres adoptés pour évaluer la vulnérabilité des constructions en maçonnerie.

N°	Paramètre
1	Type et organisation du système porteur
2	Qualité du système porteur
3	Résistance conventionnelle
4	Implantation et fondations
5	Planchers et toitures (diaphragme)
6	Configuration en plan
7	Configuration en élévation
8	Maçonneries
9	Toiture
10	Éléments non structuraux
11	État de conservation ou maintenance

L'indice de vulnérabilité de base I_v se calcule comme la somme pondérée des I_{vi} . Le tableau 1.6 montre que chaque paramètre structurel est caractérisé par une classe de vulnérabilité entre A et D et par une pondération (W_i) pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement globale de la structure.

Tableau 1.6 : Classes de vulnérabilité et pondération de chacun des paramètres structuraux, ajustés à partir des endommagements observés.

N°	Paramètre	A	B	C	D	Wi
1	Type et organisation du système porteur	0	5	20	45	1
2	Qualité du système porteur	0	5	25	45	0,25
3	Résistance conventionnelle	0	5	25	45	1,5
4	Implantation et fondations	0	5	25	45	0,75
5	Planchers et toitures (diaphragme)	0	5	15	45	Variable
6	Configuration en plan	0	5	25	45	0,5
7	Configuration en élévation	0	5	25	45	Variable
8	Maçonneries	0	5	25	45	0,25
9	Toiture	0	15	25	45	Variable
10	Éléments non structuraux	0	0	25	45	0,25
11	État de conservation ou maintenance	0	5	25	45	1

Pour les paramètres 5,7 et 9, la pondération W_i varie entre 0,5 et 1, suivant la classe de vulnérabilité.

En s'inspirant de la méthode GNDT, (Slimani, 2013) a développé une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des réservoirs de stockage d'eau surélevée en se basant sur des paramètres typologiques (type de système de contreventement, régularité en plan, régularité en élévation, type de sol...etc), et sur des paramètres qualitatifs (qualité du système de contreventement, qualité des nœuds, maintenance et détails...ect) ; celle-ci permet de classer ces ouvrages en différentes classes de vulnérabilité :

- La classe A traduit la conformité du paramètre vis-à-vis de l'intégrité de la structure ;
- La classe C est la plus vulnérable, elle traduit la situation la plus défavorable ;
- et enfin la classe B représente la situation intermédiaire.

Chaque classe est sanctionnée par une note élémentaire K_i . Le principe de notation est fonction de l'accroissement du risque de vulnérabilité.

La note élémentaire K_i prend trois valeurs 0 ; 5 ou 15, qui correspondent respectivement à la situation idéale, situation intermédiaire et situation critique, comme le montre le tableau 1.7.

Par ailleurs, des pondérations « W_i » sont affectées à chaque paramètre allant de 0,25 à 1,75 pour tenir compte de l'importance de chacun des paramètres dans le comportement global de la structure, comme l'illustre le tableau 1.7 :

Tableau 1.7 : Notes élémentaires (K_i) et les pondérations (W_i) pour chaque paramètre.

N°	paramètres	Notes élémentaires K_i			Pondération W_i
		Classe A	Classe B	Classe C	
1	Le comportement au séisme	0	5	15	1,75
2	Entrechoquement	0	5	15	1,75
3	Système de contreventement	0	5	15	1,50
4	Régularité en plan	0	5	15	1,50
5	Régularité en élévation	0	5	15	1,50
6	Type de sol	0	5	15	1,00
7	Implantation du réservoir	0	5	15	1,00
8	Zone sismique	0	5	15	1,00
9	Qualité des nœuds	0	5	15	0,75
10	Qualité du système de contreventement	0	5	15	0,75
11	Maintenance	0	5	15	0,50
12	Détails	0	5	15	0,25

La note partielle d'un paramètre est obtenue par le produit « KiWi », et l'indice de vulnérabilité I_v s'exprime par la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{12} k_i w_i$$

En considérant tous les paramètres d'analyse énumérés précédemment (tableau 1.8), la classification suivante est proposée dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1.8 : Classification des réservoirs en fonction de leurs indice de vulnérabilité « I_v ».

Classe	vert	Orange1	Orange2	Rouge
I_v	0 - 33	33 - 90	90 - 133	133 - 199

Le niveau vert : $0 \leq I_v \leq 33$ exprime que le réservoir expertisé n'est pas vulnérable au séisme. L'ouvrage présente un bon comportement et une bonne résistance à l'alea sismique.

Le niveau orange1 : $33 \leq I_v \leq 90$ exprime que la résistance sismique est assez bonne, donc le réservoir expertisé est moyennement vulnérable.

Le niveau orange 2 : $90 \leq I_v \leq 133$ exprime que la résistance sismique est faible, donc le réservoir expertisé présente une vulnérabilité assez élevée.

Le niveau rouge : $133 \leq I_v \leq 199$ exprime que les réservoirs ont une résistance sismique très faible et donc le réservoir présente une vulnérabilité sismique élevé.

Les réservoirs appartenant à la classe verte ne nécessitent pas d'intervention. Celles appartenant à la classe orange (orange 1 et orange 2) nécessitent un renforcement, une étude dans ce sens devra être effectuée. Quant à ceux appartenant à la classe rouge, ils doivent être évacués immédiatement et démolis, à moins qu'ils n'appartiennent à un patrimoine préservé ; dans ce cas une étude particulière devra être entreprise.

B. Etude de BELHOUENE

(Belhouene, 2006) propose de quantifier la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé, en développant la méthode de l'index de vulnérabilité. Ceci a nécessité la définition des paramètres influents sur la détermination de cet index, ainsi que de leurs coefficients de pondération. L'index ainsi calculé, permet la classification des bâtiments. Pour cette classification, elle propose trois classes. La première regroupe les structures ayant un bon comportement, la seconde, un comportement moyen et enfin, la troisième regroupe les constructions ayant une mauvaise tenue au séisme. Elle développe aussi un code de calcul en langage Delphi. Cet outil développé permet de faire le diagnostic des bâtiments existants en béton armé par l'analyse de la vulnérabilité sismique. Cette méthode

est développée en tenant compte de l'influence des éléments structuraux et non structuraux sur la réponse sismique de la construction. Elle consiste à attribuer une valeur numérique à chaque bâtiment, dite index de vulnérabilité I_v , qui est une représentation de sa qualité sismique.

Les paramètres utilisés pour le calcul de l'index de vulnérabilité sont au nombre de quatorze, définis par l'approche experte, basée sur le retour d'expérience de sismicité en Algérie. Afin de caractériser chacun des paramètres de l'étude, un certain nombre d'informations sur le bâtiment est nécessaire, obtenues par le renseignement de fiche d'évaluation ou d'enquêtes développée dans la cadre de cette recherche.

Tableau 1.9 : Classification des paramètres et leur coefficient K_i .

<i>N°</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Classe A</i>	<i>Classe B</i>	<i>Classe C</i>
1	Système de contreventement	0,25	1,25	2,25
2	Qualité du système de contreventement	0,25	0,50	0,75
3	La capacité sismique	0,00	0,25	0,50
4	Type de sol	0,25	0,50	0,75
5	Diaphragme horizontal	0,25	0,50	0,75
6	Régularité en plan	0,25	0,50	0,75
7	Régularité en élévation	0,25	0,75	1,75
8	Qualité des nœuds	0,25	0,50	0,75
9	Phénomène du poteau court	0,25	0,50	0,75
10	Détails	0,25	0,50	0,75
11	Maintenance	0,25	0,75	1,25
12	Modifications	0,25	0,50	0,75
13	Entrechoquement	0,25	0,50	0,75
14	Implantation de l'ouvrage	0,25	0,50	0,75

➤ **Vulnérabilité des ouvrages hydrauliques**

Parmi les études les plus intéressantes dans le cadre de ce domaine, on trouve les travaux faits par l'équipe de G. Mathieu au Cemagref (Aix en Provence, France) qui ont été repris, et ont été adapté au contexte Algérien par (Hammoum, 2012).

- (Mathieu et al, 1990) ayant travaillé sur des ouvrages hydrauliques (barrages, réservoirs...), ont proposé une classification des ouvrages selon l'indice de gravité, en se basant sur les défauts apparents. Six classes sont définies, dont la gravité va en croissance de A vers F.

Classe A : ouvrage en bon état (neuf ou ancien), sans défaut.

Classe B : défauts existants dès la naissance de l'ouvrage et sans conséquence importantes autres qu'esthétiques.

Classe C : défauts dont l'évolution peut se faire anormalement.

Classe D : défauts révélateurs d'une évolution de la dégradation d'un ouvrage. Ils sont rangés en trois sous classe :

classe D1. Défauts qui indiquent un début d'évolution.

classe D2. Défauts qui indiquent une évolution avancée pour des pièces (ou ouvrage) qui ne sont pas en contact avec des liquides.

classe D3. Défauts qui indiquent une évolution avancée pour des pièces (ou ouvrage) en contact avec des liquides.

Classe E : défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.

Classe F : défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage.

Après l'expertise de l'ouvrage, en se basant sur les défauts enregistrés sur ce dernier, un classement de l'ouvrage dans une échelle croissante d'évaluation des désordres est effectué. Celle-ci est constituée de quatre niveaux variant de 1 à 4 qui prennent en compte les six classes de défauts apparents exposé précédemment. Les différents niveaux de désordre sont donnés comme suit :

Niveau 1 : Regroupe les Classe A et classe B, Peu ou pas de désordres visibles. Rien à signaler de particulier. Suivi et entretien normale de l'ouvrage (annuel ou biannuel, suivant la nature et destination).

Niveau 2 : Classe C, quelques défauts, ouvrages à surveiller.

Niveau 3 : Regroupe les Classe D et classe E, défaut spécifique de gravité variable. Demande un suivi et des investigations.

Niveau 4 : Classe F, l'ouvrage ne peut pas assurer sa fonction en toute fiabilité. Le risque de ruine est important. Il faut envisager éventuellement des solutions confortatives de première urgence et/ou la démolition de l'ouvrage.

Les travaux de Hammoum sur un large parc de réservoirs que compte la wilaya de Jijel ont aboutis à un inventaire de défauts structuraux classés conformément à la classification établie par (Mathieu et al, 1990), avec les modes de réparations possibles.

- (**Hammoum et al, 2012**) se sont intéressés à l'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton à certains aléas naturels (séisme, neige et vent...etc.), par la détermination d'un indice « Iv » en faisant intervenir 13 paramètres influents (environnementaux, structuraux et fonctionnels). L'exposé de cette méthode fera l'objet du deuxième chapitre de ce mémoire.

Aussi, il a essayé d'apporter des solutions aux problèmes de pathologies, diagnostic et réparation, en définissant une méthodologie d'évaluation et des modes de réparation possibles. Ceci se traduit en pratique par un ou plusieurs défauts constatés et par une ou plusieurs méthodes de renforcement qui doivent conduire à un confortement de qualité et de fiabilité.

(**Saradouni, 2013**) s'est inspiré des travaux de (Hammoum, 2012) pour expertiser un parc de retenues collinaires de la wilaya de Tizi Ouzou, à travers leurs indices de vulnérabilité. Les retenues expertisées sont de type homogène, réalisées en remblai compacté.

Cette méthodologie a permis une évaluation simple et rapide de leur vulnérabilité. La détermination de l'indice de vulnérabilité dans le cycle de vie des retenues collinaires a montré à travers l'expertise des retenues étudiées, qu'au-delà d'un certain degré de dégradation les conséquences sur le comportement de la structure n'est plus négligeables. La structure, après réhabilitation gagne de la performance mais ne revient jamais à son état initial.

Elle a montré que plusieurs pathologies sont présentes sur le parc expertisé dans la wilaya de T.O (figure 1.17).

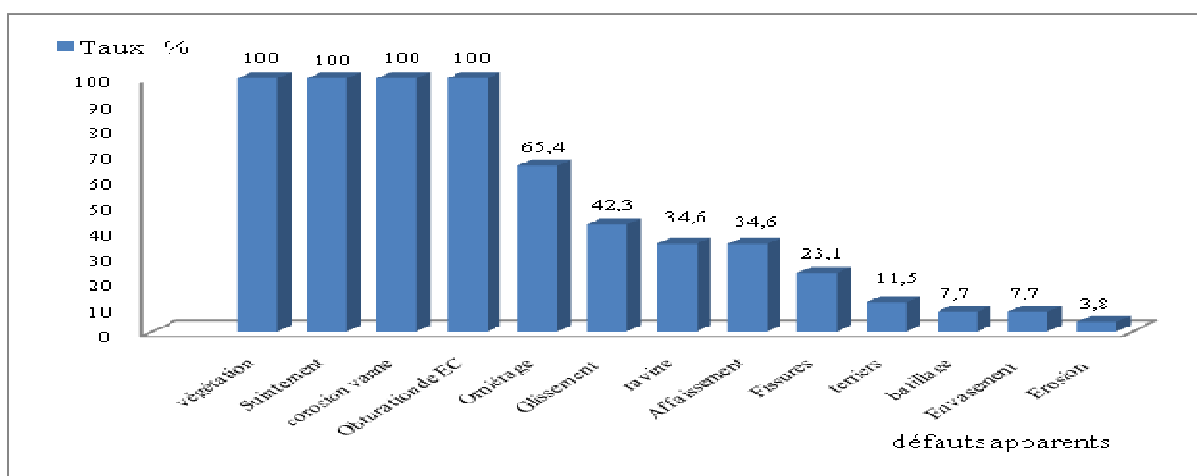


Figure 1.17 : Proportions des défauts apparents dans le parc expertisé.

La présence de végétation, la corrosion et le colmatage des vannes, l'obturation et /ou

l'endommagement des évacuateurs de crue et les fuites (suintements) sont des pathologies rencontrées sur toutes les retenues du parc expertisé (taux de 100%).

Le défaut d'orniérages occupe la seconde place dans les défauts les plus fréquemment rencontrés avec un taux allant de 65%.

Viennent par la suite les glissements, les ravines, les affaissements et les fissures, avec un taux variant de 45 % à 20 %. Leurs proportions sont proches les uns des autres.

Enfin sont classées en dernier les terriers, l'effet de batillage, l'envasement de la cuvette et l'érosion du corps de la digue avec un taux inférieur à 20%.

1.4.2.2. Analyse des risques à partir des statistiques

Quelques domaines particuliers du génie civil permettent une démarche d'analyse de risques à partir des statistiques. Il s'agit toujours de contextes où les données sur les défaillances des ouvrages sont abondantes et on trouve des traitements dans les ouvrages à grand linéaire, tels que les routes ou les réseaux enterrés. Dans ces domaines, on recherche les corrélations entre les défaillances (fissuration ou déformation d'une chaussée ; fissures, cassures ou fuites d'une canalisation) et un certain nombre de facteurs explicatifs (âge, matériaux de la structure, environnement du système...). Une fois établie l'influence des principaux facteurs, il est alors possible de prévoir les défaillances d'un ouvrage en fonction de la valeur des paramètres qui lui sont propres (son âge, sa composition, son environnement).

En synthèse, l'analyse de risques à partir des statistiques est mise en œuvre en génie civil dès lors qu'il est possible d'établir des corrélations entre les défaillances et des facteurs explicatifs. Cela suppose en corollaire de disposer de données abondantes sur les défaillances des ouvrages. Elles permettent la prévision de l'évolution du comportement d'un ouvrage (prévision des déplacements, des pressions interstitielles...) et l'anticipation des phénomènes indésirables. Il s'agit d'une approche puissante pour l'analyse de risques attachés aux mécanismes à caractère irréversible.

A travers notre étude, faisant la continuité des travaux de (Hammoum et al, 2012), nous utilisons une méthode mathématique dite analyses en composantes principales « ACP » pour mettre en valeur la sensibilité de certains paramètres influents pris en considération dans la méthode d'expertise.

La méthode ACP appartient à la famille de l'analyse des données et plus généralement de la statistique multivariée (ADM). Elle permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus qui consistent à chercher de nouveaux axes vecteurs propres correspondant aux valeurs propres ordonnées du tableau 1.10 croisant les individus et les variables quantitatives (Duby et al, 2006).

Tableau 1.10: Représentation type d'un tableau A.C.P.

Individus/ Variables	Var ₁ ...var _j ...Var _p
Ind ₁	X _{ij}
.	
.	
Ind _i	
.	
.	
ind _n	

L'ADM regroupe un ensemble de méthodes statistiques utilisées pour analyser les données caractérisées par le fait qu'à chaque individu statistique sont associées plusieurs valeurs observées. Ces méthodes d'analyses sont fondées, soit sur les mathématiques "**méthodes d'analyse factorielle**", soit sur l'informatique qualifiée le plus souvent d'automatique. Elles se distinguent les unes des autres selon les types de données décrites sur les individus et présentées sous forme de tableaux.

Et parmi les méthodes d'analyse factorielle on retrouve:

- régression linéaire simple ;
- régression linéaire multiple ;
- analyse en composantes principales (ACP);
- analyse factorielle des correspondances (AFC);
- analyse des correspondances multiples (ACM);ect.....

A. Principe et condition d'application de l'analyse factorielle

L'analyse factorielle est une méthode descriptive (par opposition aux méthodes explicatives que nous avons vues auparavant). Il n'y a plus de variables explicatives et à expliquer. On étudie l'ensemble des corrélations entre variables quantitatives pour l'ACP et qualitatives pour l'AFC.

Historiquement, il s'agit de l'un des plus anciennes méthodes d'analyse des données (Philippeau, 1986). Mais les applications informatiques ont considérablement modifié les conditions et modalités d'application, en rendant notamment possible le traitement d'un très grand nombre de données. C'est enfin la méthode la plus connue et la plus utilisée en sciences sociales.

B. Objectifs et conditions d'utilisation

L'objectif principal est la structuration des variables, c'est-à-dire la réduction des colonnes de la matrice des données : on veut **résumer l'information**.

Pour ce faire, on remplace les variables initiales par un nombre plus restreint de variables dites « composites » (ou « facteurs »), obtenues par « regroupement » des variables initiales les plus corrélées entre elles.

Cela nécessite :

1. un nombre d'individu supérieur à 15
2. qu'il y ait plus d'individus que de variables

C. Méthodes d'analyse factorielle

C.1. Régression linéaire

Elle est définie par la régression linéaire simple et la régression linéaire multiple :

C.1.1. Régression linéaire simple

En statistiques, plusieurs problèmes consistent à définir la relation qui existe entre deux variables statistiques. Nous appelons régression linéaire l'ajustement d'une droite au nuage statistique d'une série de couples de données.

Ainsi, une régression linéaire simple va permettre de résumer, d'interpréter et de prévoir les variations d'un caractère dit dépendant (y) en fonction d'un autre dit indépendant (x) et ce en utilisant une droite. Le calcul de cette droite repose sur la méthode des moindres carrés.

C.1.2. régression linéaire multiple

Le modèle de régression linéaire multiple est l'outil statistique le plus habituellement mis en œuvre pour l'étude de données multidimensionnelles. Cas particulier de modèle linéaire, il constitue la généralisation naturelle de la régression simple.

Une variable quantitative y dite à expliquer (ou encore, réponse, exogène, dépendante) est mise en relation avec p variables quantitatives $x^1, \dots, x^p$ dites explicatives (ou encore de contrôle, endogènes, indépendantes, régresseurs), supposée non aléatoires.

Par exemple, une analyse de régression multiple peut révéler une relation positive entre la demande de lunettes de soleil et différents caractères démographiques (âge, salaire) des acheteurs de ce produit. La demande augmente et baisse avec les variations de ces caractéristiques.

L'utilisation de la régression linéaire n'est pas réservée uniquement à l'analyse technique. Elle est utilisée dans des domaines et secteurs variés. Nous présenterons dans ce qui suit un exemple qui illustre cette approche classique de la régression linéaire.

La régression linéaire a été utilisée pour l'analyse de la maladie de trachome en fonction de paramètres biogéographiques. Le trachome est une maladie contagieuse qui se transmet d'enfant à enfant ou de mère à enfant. L'infection se manifeste dès la première année et la prévalence augmente très rapidement pour atteindre un maximum qui serait d'autant plus précoce que le niveau de l'endémie est élevé. Dans une étude épidémiologique ils ont remarqué qu'au Soudan la prévalence du trachome actif est inversement corrélée avec la pluviométrie et l'hygrométrie. Et dans l'enquête nationale réalisée au Mali, il a été observé que le trachome actif était plus fréquent dans les régions sèches du nord comme Gao ou Tombouctou (Laffly, 2006).

C.2. Analyse factorielle des correspondances (AFC)

L'analyse factorielle des correspondances, notée AFC, est une analyse destinée au traitement des tableaux de données où les valeurs sont positives et homogènes comme les tableaux de contingence (qui constituent la majeure partie des tableaux traités par cette méthode), elle cherche à décrire la liaison entre deux variables qualitatives.

L'AFC a été introduite de façon complète dans les années 60 par JP BENZECRI. Les composantes principales sont toujours obtenues à partir de la distance entre les différents points des nuages multidimensionnels, mais les points ont des coordonnées qui ont subi une transformation préalable permettant de conserver une métrique identique à celle de l'ACP pour calculer ces distances.

Le but principal de l'AFC reste donc le même ; lire l'information contenue dans un espace multidimensionnel par une réduction de la dimension de cet espace tout en conservant un maximum de l'information contenu dans l'espace de départ.

L'AFC a été utilisé pour l'étude des peuplements benthiques (le benthos est l'ensemble

des organismes aquatiques vivant à proximité du fond des mers et océans, des lacs et cours d'eau) de la cote catalane Française (Guille et *al*, 1975). L'application de l'analyse factorielle des correspondances a été utilisée par Guille en 1970 (Guille et *al*, 1975), il a démontré l'influence prépondérante de la composition granulométrique du substrat sur la répartition des benthontes est mise en évidence dans les conditions physiographiques particulières de la région étudiée.

Remarque : Un tableau de contingence est une méthode de représentation de données découlant d'un comptage. Les données sont rassemblées dans un tableau avec le caractère auquel elles sont reliées.

C.3. Analyse des correspondances multiples (ACM)

L'**analyse des correspondances multiples** (ACM) est la méthode factorielle de réduction de dimension pour l'exploration statistique de données qualitatives complexes. Cette méthode est une généralisation de l'Analyse Factorielle des Correspondances, permettant de décrire les relations entre p ($p > 2$) variables qualitatives simultanément observées sur n individus. Elle est aussi souvent utilisée pour la construction de scores comme préalable à une méthode de classification nécessitant des données quantitatives.

Malgré des propriétés communes, l'ACM est une méthode bien distincte de l'analyse factorielle des correspondances (AFC) adaptée, aux tableaux de contingence.

Nous nous plaçons donc dans la situation où nous disposons de N individus statistiques, décrits par q variables nominales ou ordinales $X_1, X_2, \dots, X_q$. L'ACM vise à mettre en évidence :

- les relations entre les modalités des différentes variables ;
- éventuellement, les relations entre individus statistiques ;
- les relations entre les variables, telles qu'elles apparaissent à partir des relations entre modalités.

(L'Observatoire National des Maladies du Bois de la Vigne, 2003-2005) a utilisé l'ACM pour dresser un état des lieux de la répartition, de la fréquence et de l'intensité de l'expression des symptômes foliaires des maladies du bois, pour répondre objectivement à la question de leur progression éventuelle dans le vignoble français. En effet, suite à l'interdiction de l'utilisation de l'arsénite de soude en traitement d'hiver de la vigne, le 8 novembre 2001, les viticulteurs ne disposent plus d'aucune méthode de lutte chimique « curative » contre les principales maladies du bois de la vigne.

C.4. Analyse en composante principale (ACP)

L'Analyse en composantes principales (ACP) consiste à transformer des variables liées entre elles (dites "corrélées" en statistique) en nouvelles variables décorrélées 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.

L'analyse en Composante Principale a été utilisée dans la région d'Annaba pour la détection de défauts avec applications aux paramètres de pollution de la région d'Annaba (Bara et *al*, 2009). La détection de défauts est devenue de plus en plus importante pour la surveillance des processus à cause de la demande croissante de la haute performance, du gain, ainsi que de la nécessité accrue de la sécurité et de la fiabilité des systèmes dynamiques. Dans le cadre général de la surveillance des systèmes, l'approche connue de l'Analyse en Composante Principale (ACP) a été choisie. L'ACP a été souvent utilisé pour sa simplicité et sa capacité à capturer les relations linéaires entre les variables du processus à l'état stationnaire. Cependant cette méthode montre des limitations à traiter les données industrielles qui généralement présentent un caractère non linéaire multi-échelle, impliquant des événements dont le comportement change dans le domaine temporel et fréquentiel. Cette étude s'est appuyée sur la modélisation par l'ACP non linéaire à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNAs), pour extraire l'inter-corrélation non linéaire entre les variables et de l'analyse en ondelette pour décomposer chaque signal de capteur en signaux d'approximation et de détails à différentes échelles. Les contributions de chaque variable pour chaque échelle ont été collectées dans des matrices séparées. Un modèle ACP non linéaire est alors construit pour chaque matrice pour extraire la corrélation non linéaire entre les variables présentes dans chaque échelle (Bara et *al*, 2009).

➤ différence entre l'ACP et l'AFC

L'AFC offre la particularité (contrairement aux ACP) de fournir un espace de représentation commun aux variables et aux individus. Pour cela l'AFC raisonne à partir de tableau réduit ou de fréquences.

L'ACP se fait dans un cadre différent ; les variables sont quantitatives et donc il est possible de faire des opérations mathématiques sur les valeurs des variables.

Conclusion

Plusieurs approches d'évaluation de la vulnérabilité d'une structure donnée ont été développées afin de réduire les pertes et les dommages dus aux aléas naturels. Ces approches diffèrent les unes des autres en coût, en moyens utilisés et en précision. Le choix du type d'approche dépend de l'objectif de l'évaluation, de la disponibilité des données et de la technologie utilisée.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes les plus connues d'estimation de la vulnérabilité. La compréhension de la structure et la recherche des critères structuraux peuvent s'avérer complexes. Il faut donc trouver un équilibre entre les moyens mis en œuvre, les méthodes applicables et les résultats recherchés. D'autre part, ces méthodes varient suivant leurs degrés de précision et de sophistication ; ce qui engendre des coûts d'application importants ou des incertitudes élevées à cause de la complexité des informations recherchées.

En s'inspirant des travaux de différentes méthodes suscitées, tout particulièrement sur l'analyse des risques à partir des statistiques, nous utilisons pour la première fois une méthode dite ACP afin d'étudier les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus pour éviter la redondance de certains paramètres pris en considération par (Hammoum, 2012) par la méthode d'expertise des réservoirs de stockage d'eau. Cette méthode sera présentée au troisième chapitre.

Chapitre 2

Evaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton vis-à-vis de certains aléas naturels, par une approche par expertise

Introduction

Le diagnostic et l'analyse de risque peuvent être réalisés par expertise pure dans le cadre d'études préliminaires ou de diagnostic rapide. Cette approche qui fait appel à l'inspection visuelle est pratiquée par les experts lorsqu'ils ne disposent pas de données suffisantes sur l'ouvrage. Un ingénieur expérimenté peut dès la première visite connaître l'origine probable du problème, mais pour un autre moins expérimenté la même tâche peut devenir difficile. Le diagnostic reste toujours un exercice dans le niveau de difficulté est très relatif. Devant le même problème exposé, les solutions proposées par les experts ne sont pas évidemment uniques. Chaque expert interprète le problème selon ses propres connaissances, car il n'existe pas une loi dite de diagnostic, mais il y a un savoir faire pour le diagnostic.

Dans certaines situations d'urgence (après un grave séisme, ou une forte crue), la tâche de diagnostic exige au même temps rapidité et efficacité. Dans ces situations exceptionnelles, il y a toujours une insuffisance d'experts, si bien qu'on est amené à faire participer les ingénieurs les moins expérimentés dans la tâche de diagnostic.

C'est ainsi que nous exposons, dans ce chapitre, une méthode simple et pratique permettant à un professionnel (technicien ou ingénieur) en génie civil ou même un architecte n'ayant pas des compétences pour évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité vis-à-vis de certains aléas naturels (vent, neige, séisme,...etc.) d'un ouvrage hydraulique, en les guidant dans leur diagnostic. Cette méthode développée par (Hammoum, 2012) consiste à identifier plusieurs facteurs. Leur identification permet de préserver un réservoir de stockage contre les aléas futurs.

2.1. Evaluation de la vulnérabilité d'un réservoir

(Mathieu, 2003) a proposé une méthode d'évaluation applicable aux réservoirs ayant pour but d'indiquer les ouvrages qui ont un environnement sensible, un caractère stratégique important et ceux qui présentent ou non des désordres structurels visuels de gravité variable. Cette méthode est basée sur différents types d'analyses ; structurelle, fonctionnelle et environnementale, comme le montre l'organigramme ci-après (figure 2.1). Une fiche descriptive permet la collecte des informations générales de l'ouvrage ; elle comporte le nom ou le lieu dit du site, ses coordonnées géographiques afin de permettre le géocodage et son implantation future dans un SIG, les données sur son exploitation et enfin l'historique des désordres enregistrés dans le passé.

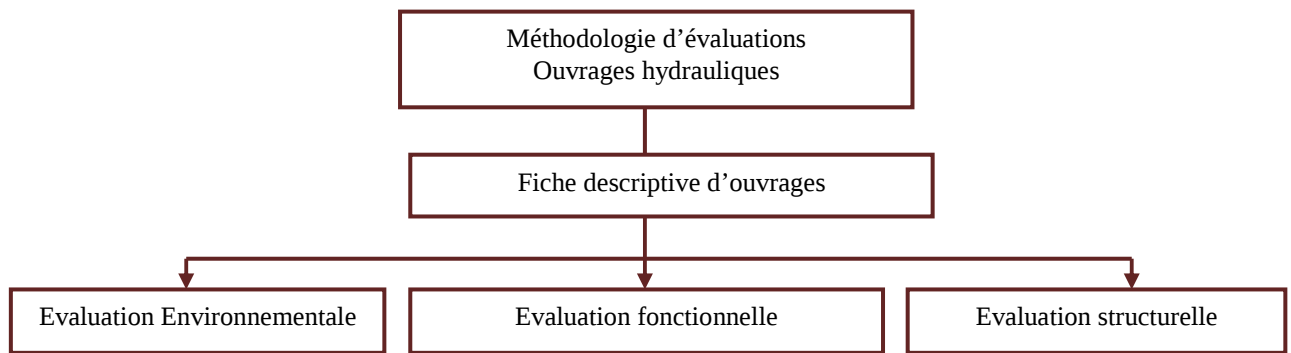


Figure 2. 1 : Organigramme de la méthodologie d'évaluation des réservoirs (Mathieu, 2003).

En se basant sur cette approche, (Hammoum et al, 2012) se sont intéressés à l'évaluation de la vulnérabilité d'un réservoir donné en béton vis-à-vis de certains aléas naturels (séisme, vent, neige,...), par la détermination d'un indice I_v . Pour le calcul de cet indice, il a fait intervenir treize (13) paramètres qui sont résumés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Liste des paramètres d'analyse.

Type d'analyse	N°	Désignation des paramètres
Analyse environnementale	1	Implantation du réservoir
	2	Zone sismique
	3	Type de sol
	4	Zone de la neige
	5	Zone du vent
Analyse structurelle	6	Type de la structure
	7	Type de fondation
	8	Etanchéité des parois
	9	Etanchéité de la couverture
Analyse fonctionnelle	10	Défauts apparents
	11	Rôle de réservoir
	12	Importance du réservoir
	13	Fréquence d'entretien

Chacun des treize paramètres sera sanctionné par une note élémentaire N_{ei} . 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 P_i de pondération.

La note élémentaire N_{ei} 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 P_i 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.

La note partielle d'un paramètre est alors obtenue par le produit ($N_{ei} \cdot P_i$) et l'indice de vulnérabilité « I_v » s'exprime comme la somme des notes partielles des différents paramètres :

$$I_v = \sum_{i=1}^{13} N_{ei} \cdot P_i = N_e + N_s + N_f$$

Nous désignons par (N_e , N_s , N_f) les notes globales respectivement de l'analyse environnementale, de l'analyse structurelle et de l'analyse fonctionnelle.

Le choix des paramètres 1, 2, 3, 4 et 5 de l'analyse environnementale est dicté par des considérations d'implantations topographiques et hydrauliques au moment de la conception de l'étude. Par conséquent, la note globale de l'analyse environnementale N_e reste constante dans le temps.

Les paramètres 6, 7, 8, 9 et 10 caractérisent l'état des différents éléments structuraux du réservoir au moment de l'inspection visuelle par l'ingénieur expert. Elle résulte des dommages et vieillissement cumulés suite aux attaques et agressions d'ordre naturels (neige, vent, séisme, gel...). A cet effet, la note globale de l'analyse structurelle N_s est variable dans le temps.

Les paramètres 11, 12 et 13 ont un rapport avec les enjeux, la vocation et de l'usage de l'eau du réservoir. Pour cette raison, la note globale de l'analyse fonctionnelle N_f demeure constante dans le temps, sauf si le gestionnaire décide de lui changer d'affectation.

La notion de l'indice de vulnérabilité est liée à l'instant où l'on inspecte le réservoir. Il vient qu'un même réservoir peut avoir plusieurs indices de vulnérabilités durant son cycle de vie. Si nous considérons que I_{v0} est l'indice de vulnérabilité à l'instant initial où le réservoir est mis en service, après une durée t d'exploitation, cet indice va passer à I_{v1} ($I_{v1} > I_{v0}$). Son état de dégradation et son état de vieillissement atteint dans le temps va le rendre plus vulnérable aux aléas naturels qu'à son état initial. Par conséquent, pour faire baisser l'indice de vulnérabilité,

il est nécessaire d'agir directement sur les paramètres de la note globale de l'analyse structurelle N_s , et ce en passant par un projet de réhabilitation ou de réparation du réservoir.

2.2. Evaluation environnementale

2.2.1. Implantation de l'ouvrage

Un réservoir est exposé à diverses agressions de son milieu d'implantation naturel ; tels que les écarts de température, l'humidité, la présence et l'attaque par les chlorures, l'effet du gel et du dégel et l'air marin. L'implantation de l'ouvrage est abordée ici sous le double aspect de la climatologie et de l'hydrologie. Le découpage climatique de l'Algérie peut être représenté globalement par cinq zones. Pour chaque zone, nous proposons une note élémentaire, tel que l'illustre le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Notes élémentaires de l'implantation de l'ouvrage.

N°	Lieu d'implantation de l'ouvrage	N_{ei}
1	Montagne : Précipitations importantes avec plusieurs mois consécutifs d'enneigement.	1
2	Vallées du tell : climat froid et humide à faibles amplitudes thermiques avec des chutes de neige abondantes.	2
3	Hauts plateaux et Nord de l'Atlas Saharien : climat froid et sec en hiver et chaud et sec en été avec de forts écarts de température.	2
4	Grandes étendues sahariennes : climat froids et sec en hiver avec de forts écarts de température, chaud et sec en été.	3
5	Région côtière : climat humide avec des embruns en bord de mer. Milieux agressif par la présence d'eaux plus ou moins salines.	4

Les pondérations P_i sont déterminées à partir du paramètre hydrologique (tableau 2.3). Trois lois régissent la répartition des pluies en Algérie et ont été définies par Seltzer en 1946, comme suit :

- la hauteur de pluie augmente avec l'altitude. Elle est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les autres,
- elles augmentent de l'Ouest vers l'Est,
- elles diminuent à mesure qu'on s'éloigne de littoral méditerranéen vers le sud.

Tableau 2.3 : Coefficients de pondération en fonction de la situation géographique.

N°	Situation géographique.	P_i
1	Réservoir situé sur la bande nord - Est de l'Algérie	4
2	Réservoir situé sur la bande nord au centre de l'Algérie	3
3	Réservoir situé sur la bande nord - Ouest de l'Algérie	2
4	Réservoir situé au sud de l'Algérie	1

2.2.2. Zone sismique

En Algérie, le critère de zonage sismique (DTR B-C 2-48, 2003), classe le territoire en quatre zones de sismicité croissante. Nous proposons pour les différentes zones les notes élémentaires données dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Notes élémentaires de la zone sismique.

N°	Zone	Sismicité	Nei
1	Zone 0	négligeable	1
2	Zone I	Faible	1
3	Zone IIa	moyenne	2
4	Zone IIb	moyenne	3
5	Zone III	Elevée	4

Par ailleurs, les coefficients de pondération P_i dépendent du risque majeur que représente le réservoir pour les vies humaines, conséquences économiques et sociales comme cela a été observé lors des séismes survenus en Algérie (El Asnam 1980, Oued Djer 1988, Tipaza 1989, Mascara 1994 et Boumerdes 2003). Ces coefficients sont déterminés selon la nature du site d'implantation (tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Coefficients de pondération en fonction du site de l'ouvrage.

N°	Site d'implantation de l'ouvrage	P_i
1	En rase compagne	1
2	En milieu rural	2
3	Dans une zone industrielle	3
4	En milieu urbain	4

2.2.3. Type de sol

L'aspect géologique est pris en compte en analysant la catégorie du site d'implantation qui est fonction des propriétés mécaniques du sol (tableau 2.6). Les sites sont classés en quatre catégories par le Règlement Parasismique Algérien (DTR B-C 2-48, 2003) en fonction de la vitesse moyenne de l'onde de cisaillement V_s .

Tableau 2.6: Notes élémentaires en fonction des conditions du terrain.

N°	Type de sol	Nature de sol	Vitesse moyenne	N_{ei}
1	Catégorie S_1	Sol rocheux	$V_s \geq 800$ m/s	1
2	Catégorie S_2	Sol ferme	$V_s \geq 400$ m/s	2
3	Catégorie S_3	Sol meuble	$V_s \geq 200$ m/s	3
4	Catégorie S_4	Sol très meuble	$V_s < 200$ m/s	4

Les poids P_i sont déterminés par certains effets du site d'implantation (liquéfaction des sables,

le glissement de terrain, présence de faille en surface et les éboulements rocheux) qui peuvent considérablement amplifier les oscillations du sol et provoquer la perte de tout ouvrage de génie civil, même parasismique. Les ouvrages qui y sont implantés peuvent parfois subir des charges sismiques jusqu'à cinq fois plus élevées que les constructions similaires situées dans une zone moins dangereuse (Zacek, 2004). Il est donc impératif d'en tenir compte dans une étude de vulnérabilité et le recours à un géotechnicien ou géologue serait souhaitable. En résumé, nous pouvons définir les poids P_i comme indiqué dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7 : Coefficients de pondération en fonction des effets de site.

N°	Effet de site d'implantation de l'ouvrage	P_i
1	Risque de liquéfaction de sol en milieu alluvionnaire	1
2	Présence de faille en surface	2
3	Risque d'éboulement rocheux	3
4	Risque de glissement de terrain	4

2.2.4. Zone de la neige

Le Règlement Neige et Vent 99 (DTR C 2-4.7, 2000) dresse une carte de neige en décomposant le territoire Algérien en quatre zones. La surcharge de neige sur le sol S_k par unité de surface est fonction de la localisation géographique (zone) et de l'altitude H par rapport au niveau de la mer (tableau 2.8).

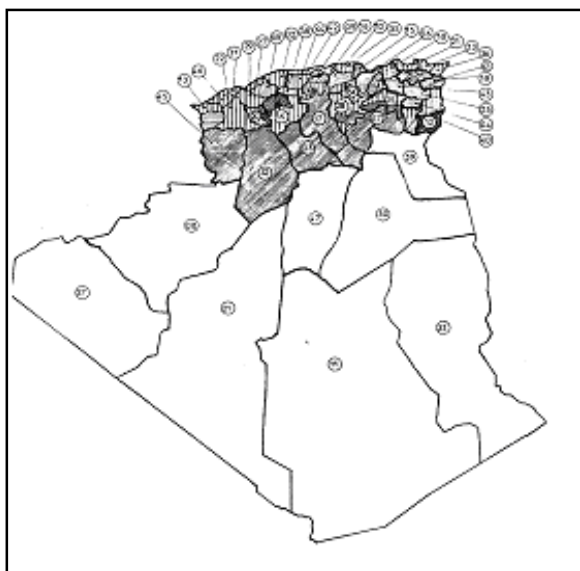


Figure 2.2 : Carte du zonage de neige d'Algérie.

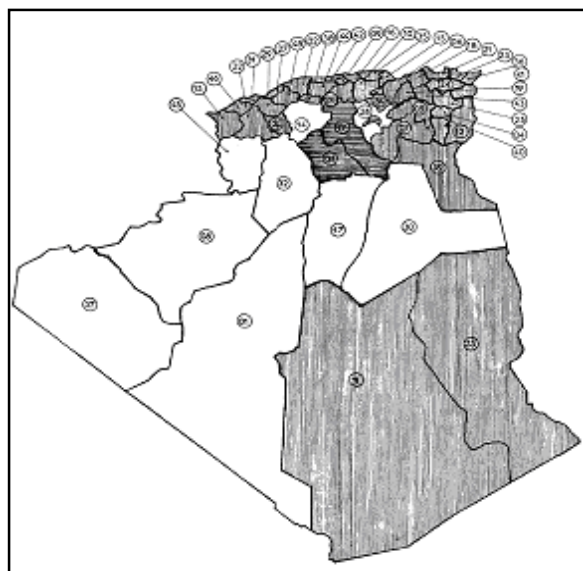


Figure 2.3 : Carte du zonage de vent d'Algérie.

Tableau 2.8 : Notes élémentaires en fonction du zonage de neige.

N°	Zone de neige	N _{ei}
1	Zone A	4
2	Zone B	3
3	Zone C	2
4	Zone D	1

Notons que pour la zone D dans le désert Algérien, nous observons plutôt l'ensablement des terrasses de couverture. La pondération P_i du paramètre de zone de neige est déterminée par la forme de la toiture ; selon qu'elle favorise ou non l'accumulation de la neige (tableau 2.9).

Tableau 2.9 : Coefficients de pondération en fonction de la forme de la toiture.

N°	Toiture de couverture	P _i
1	En forme de voute	1
2	En pentes à un ou deux versants	2
3	A versants multiples ou à redans	3
4	Avec discontinuités de niveaux marquées ou horizontales	4

2.2.5. Action du vent

Le Règlement Neige et Vent 99 a recours à la notion de vitesse de référence du vent V_{ref} pour le découpage du territoire Algérien, en trois zones de vent. V_{ref} est définie comme une vitesse moyenne sur dix minutes mesurée dans les conditions conventionnelles avec une période de retour de 50 ans. Le tableau 2.10 donne les notes élémentaires correspondant à l'action du vent.

Tableau 2.10 : Notes élémentaires de l'action du vent.

N°	Zones de vent	Vitesse de référence V_{ref} [m/s]	N _{ei}
1	Pas d'action de vent	---	1
2	Zone I	25	2
3	Zone II	28	3
4	Zone III	31	4

Les coefficients de pondération P_i seront déterminés en se référant au Règlement Neige et Vent pour tenir compte des facteurs de site pouvant amplifier l'effet du vent sur le réservoir :

- **Hauteur du réservoir**
 - réservoir enterré : $P_h = 0.25$,
 - réservoir semi enterré : $P_h = 0.50$,

- réservoir au sol : $P_h = 0.75$,

- réservoir surélevé : $P_h = 1.00$.

- **Catégorie de terrain**

- en bord de mer, au bord d'un plan d'eau offrant au moins 5 km de longueur au vent, régions lisses et sans obstacles : $P_c = 0.25$,

- régions de culture avec haies et avec des petites fermes, maisons ou arbres. $P_c = 0.50$,

- zones industrielles ou suburbaines, forêts : $P_c = 0.75$,

- zones urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15 m : $P_c = 1.00$.

- **Facteur topographique**

- Site 1 : site plat aux alentours des vallées et oueds sans effet d'entonnoir : $P_t = 0.25$,

- Site 2 : site aux alentours des vallées et oueds avec effet d'entonnoir : $P_t = 0.50$,

- Site 3 : site aux alentours des plateaux : $P_t = 0.75$,

- Site 4 : site montagneux ou aux alentours des collines : $P_t = 1.00$.

- **Etat de la surface du réservoir**

- Lisse (béton lisse, peinture lisse, paroi bien enduite) : $P_s = 0.25$,

- Peu rugueux (béton moyennement rugueux, paroi mal enduite) : $P_s = 0.50$,

- Rugueux (béton rugueux, paroi non enduite) : $P_s = 0.75$,

- Très rugueux (ondulations, nervures, plissements) : $P_s = 1.00$.

Le coefficient de pondération P_i sera donné par la somme des pondérations partielles des quatre facteurs.

$$P_i = P_h + P_c + P_t + P_s$$

2.3. Evaluation structurelle

2.3.1. Type de structure

La connaissance du système structurel et de la nature des matériaux avec lesquels sont réalisés les éléments structuraux est indispensable pour comprendre le comportement du réservoir vis à vis d'une excitation sismique pour pouvoir ainsi donner des explications probables aux dommages observés. Les notes élémentaires correspondant aux types de structures sont illustrées sur le tableau 2.11.

Tableau 2.11 : Notes élémentaires en fonction du type de structure.

N°	Type de structure	N _{ei}
1	Réservoir enterré	1
2	Réservoir semi enterré	2
3	Réservoir posé au sol	3
4	Réservoir surélevé (château d'eau)	4

Les coefficients P_i sont déterminés en fonction du type de matériaux utilisés pour la réalisation des éléments structuraux de l'ouvrage (tableau 2.12).

Tableau 2.12 : Coefficients de pondération en fonction du type de matériaux.

N°	Type de matériaux des éléments	P _i
1	Charpente métallique	1
2	Béton précontraint	2
3	Béton arme	3
4	Maçonnerie	4

2.3.2. Type de fondation

La particularité des réservoirs est qu'ils subissent de fortes variations de surcharge d'exploitation (eau contenue dans la cuve), de façon souvent quotidienne et pour certains 3 à 4 fois par jour durant toute leur longue période d'exploitation (Mathieu, 2003). Le type de fondation nous renseigne sur le comportement d'ensemble du réservoir vis-à-vis de ces chargements cycliques. Une note est alors associée à chaque type de fondation (tableau 2.13).

Tableau 2.13 : Notes élémentaire en fonction du type de fondations.

N°	Type de fondation	N _{ei}
1	Puits ou pieux	1
2	Radier général	2
3	Semelles continues	3
4	Semelles isolées	4

Comme le sol de fondation subit un chargement cyclique (plusieurs fois par jour), le mécanisme physique mis en jeu est le tassement de la fondation. Ce phénomène, fréquemment rencontré, génère des fissures dans la structure ainsi que des désordres importants ou localisés dans un élément résistant qui peuvent entraîner la limitation ou l'interdiction de l'exploitation du réservoir. C'est pour cette raison que les poids P_i sont déterminés compte tenu des tassements éventuels subits par la fondation (Tableau 2.14).

Tableau 2.14 : Coefficients de pondération en fonction des tassements de la fondation.

N°	Etat des tassements	P _i
1	Pas de tassements apparents	1
2	Début d'évolution du tassement avec arrêt	2
3	Tassement indiquant une évolution avancée	3
4	Tassement qui traduit une modification du comportement de la structure	4

2.3.3. Etanchéité des parois

Les réservoirs sont classés selon leur mode d'étanchéité (Ducrot *et al*, 1999) comme suit :

- classe A : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule,
- classe B : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure, complétée par un revêtement d'imperméabilisation,
- classe C : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou indépendant du support, la structure n'assurant qu'une fonction mécanique,
- classe D : ouvrages construits à l'aide d'éléments préfabriqués.

Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 2.15, en fonction des classes d'étanchéité. Quant aux poids P_i, ils sont déterminés en fonction du degré de satisfaction de cette étanchéité tels que donnés au tableau 2.16.

Tableau 2.15 : Notes élémentaires en fonction du mode d'étanchéité de la paroi.

N°	Mode d'étanchéité de la paroi	N _{ei}
1	Classe A	1
2	Classe B	2
3	Classe C	3
4	Classe D	4

Tableau 2.16 : Coefficient de pondération en fonction de l'état de l'étanchéité.

N°	Etat de l'étanchéité de la paroi	P _i
1	Satisfaisante	1
2	Assez satisfaisante	2
3	Moyennement satisfaisante	3
4	Insatisfaisante	4

2.3.4. Etanchéité de la couverture

Les notes élémentaires sont allouées en fonction du type de revêtement réalisé conformément au tableau 2.17. Quant aux poids P_i , ils sont déterminés en fonction du degré de dégradation et par voie de conséquence de l'état de satisfaction de cette étanchéité comme indiqué au tableau 2.18.

Tableau 2.17 : Notes élémentaires en fonction du type d'étanchéité de la couverture.

N°	Type de couverture	N_{ei}
1	Revêtement par imprégnation de surface	1
2	Revêtement de type enduit	2
3	Revêtement résine synthétique	3
4	Revêtement par membrane	4

Tableau 2.18 : Pondération en fonction du degré de satisfaction de l'étanchéité.

N°	Etat de l'étanchéité de la couverture	P_i
1	Neuve, pas de désordres visibles, satisfaisante	1
2	Peu de désordres visibles, assez satisfaisante	2
3	Vétuste, moyennement satisfaisante	3
4	Dégradée, insatisfaisante	4

2.3.5. Défauts apparents

Pour les défauts rencontrés, le support à cette étude est la connaissance experte contenue dans la documentation technique relative à la pathologie des réservoirs. Près d'une centaine de défauts apparents sur les réservoirs en béton armé, béton précontraint et en maçonnerie ont été recensés par Mathieu. Il associe à chaque défaut un indice de gravité et propose un mode de réparation du défaut et dresse également une échelle croissante d'évaluation des désordres constituée de quatre niveaux (Mathieu et al, 1996).

- Niveau 1 : Peu ou pas de désordres visibles. Rien à signaler de particulier. Suivi et entretien normal de l'ouvrage (annuel ou biannuel, suivant nature et destination).
- Niveau 2 : Quelques défauts, ouvrage à surveiller.
- Niveau 3 : Défauts spécifiques de gravité variable. Demande un suivi et des investigations.
- Niveau 4 : L'ouvrage ne peut assurer sa fonction en toute fiabilité. Le risque de ruine est important. Il faut envisager éventuellement des solutions confortative de première urgence et/ou la démolition de l'ouvrage.

Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 2.19. Le défaut apparent n'a

de sens, que si on lui associe l'âge de l'ouvrage. Ce qui nous amène à proposer les coefficients de pondérations P_i contenus dans le tableau 2.20.

Tableau 2.19 : Notes élémentaires en fonction de l'indice de gravité du défaut.

N°	Indice de gravité	N _{ei}
1	Niveau 1	1
2	Niveau 2	2
3	Niveau 3	3
4	Niveau 4	4

Tableau 2.20 : Coefficients de pondération en fonction de l'âge de l'ouvrage.

N°	Age de l'ouvrage	P _i
1	Age du réservoir inférieur à 10 ans	1
2	Age compris entre 11 ans et 20 ans	2
3	Age compris entre 21 ans et 30 ans	3
4	Age du réservoir supérieur à 30 ans	4

2.4. Evaluation fonctionnelle

2.4.1. Rôle du réservoir

L'intérêt accordé à un réservoir par le gestionnaire du patrimoine de réservoirs de stockage est fonction du rôle qu'il occupe dans le système d'alimentation. La note élémentaire accordée à ce paramètre dépend de la position du réservoir dans le schéma d'alimentation en eau potable comme indiqué au tableau 2.21. Quant aux poids P_i , ils sont déterminés en fonction de l'état de l'accessibilité pour l'entretien ou la réparation de l'ouvrage expertisé comme proposé au tableau 2.22.

Tableau 2.21 : Notes élémentaires du rôle de réservoir.

N°	Rôle du réservoir dans le système d'alimentation	N _{ei}
1	Réservoir brise charge ou de transit	1
2	Réservoir de distribution	2
3	Réservoir de tête (ou réservoir tampon)	3
4	Réservoir de station de pompage	4

Tableau 2.22 : Pondération en fonction de l'état de l'accessibilité pour entretien.

N°	Etat de l'accessibilité du réservoir	P _i
1	Accessibilité par route revêtue	1
2	Accessibilité par piste carrossable	2
3	Accessibilité par sentier piéton	3
4	Réservoir inaccessible	4

2.4.2. Importance du réservoir

En s'inspirant du RPA 2003, les bâtiments (alimentés par les réservoirs) peuvent être classés en quatre groupes d'usage, en fonction de leur importance vis-à-vis de la protection des personnes (abonnés) abritées, des biens économiques et culturels de la communauté qu'ils représentent.

- *Groupe 1A* : Bâtiments d'importance vitale qui doivent demeurer opérationnels après un séisme majeur pour les besoins de la survie de la région, de la sécurité publique, de la défense nationale et le bâtiment abritant les centres de décisions stratégiques.
- *Groupe 1B* : Bâtiments de grande importance abritant fréquemment de grands rassemblements de personnes, tels qu'une grande mosquée, des bâtiments à usage de bureaux, des bâtiments industriels et commerciaux, scolaires, universitaires, constructions sportives et culturelles, pénitenciers, grands hôtels, bibliothèques ou d'archives d'importance régionale, musée, établissements sanitaires autres que ceux du groupe 1A et les centres de production ou de distribution d'énergie.
- *Groupe 2* : Ouvrages courants ou d'importance moyenne tels que bâtiments d'habitation collective ou à usage de bureaux, bâtiments pouvant accueillir au plus 300 personnes simultanément tels que, des bâtiments à usage de bureaux, des bâtiments industriels, des parkings de stationnement publics,...
- *Groupe 3* : Ouvrages de faible importance tels que les bâtiments industriels ou agricoles abritant des biens de faibles valeurs, bâtiments à risque limité pour les personnes et les constructions provisoires

Nous pouvons alors déduire que l'intérêt accordé à un réservoir dépend aussi de la sureté de distribution de l'eau aux bâtiments abritant les usagers. Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires du tableau 2.23.

Tableau 2.23 : Notes élémentaires en fonction de l'importance de l'ouvrage.

N°	Importance du réservoir	N _{ei}
1	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 3	1
2	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 2	2
3	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 1B	3
4	Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 1A	4

Le second aspect qui mérite d'être abordé pour compléter la sécurité et la sureté de distribution des abonnés est la capacité de stockage. C'est dans cette optique que nous proposons des poids P_i en fonction de la capacité de stockage du réservoir comme indiqués

au tableau 2.24.

Tableau 2.24 : Pondération en fonction de la capacité de stockage du réservoir.

N°	Capacité de l'ouvrage	P _i
1	entre 0 à 500 m ³	1
2	entre 500 m ³ et 1 000 m ³	2
3	entre 1000 m ³ et 2 000 m ³	3
4	supérieur à 2 000 m ³	4

2.4.3. Fréquence d'entretien

La maîtrise du vieillissement des réservoirs en service ne peut être assurée que par des opérations d'entretien et de réparation. Cette opération influe directement sur le niveau de vulnérabilité des réservoirs. Ce qui nous amène à proposer les notes élémentaires données au tableau 2.25.

La pondération à considérer pour ce paramètre est le rôle du réservoir dans le réseau d'alimentation et son importance dans la distribution des abonnés. Or ces paramètres ont déjà été abordés plus haut. Ce qui nous amène à considérer une pondération égale à 1 pour toutes les fréquences d'entretien.

Tableau 2.25 : Notes élémentaires en fonction de la fréquence d'entretien du réservoir.

N°	Fréquence d'entretien	N _{ei}
1	Mensuelle	1
2	Trimestrielle	2
3	Semestrielle	3
4	Annuelle	4

2.5. Classification

Pour un critère donné, nous pouvons construire une grille d'évolution de sa note partielle (N_{ei}.P_i), en tenant compte de tous les scénarios possibles. Les résultats obtenus sont illustrés sur le tableau 2.26.

Tableau 2.26 : Grille de hiérarchisation d'une note partielle d'un paramètre.

Pondération P _i	Note élémentaire N _{ei}			
	1	2	3	4
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 treize, nous proposons la classification suivante, répartie en quatre niveaux de vulnérabilité :

Tableau 2.27 : Classification d'un réservoir en fonction de son « I_v ».

Niveau de vulnérabilité	Vert	Orange 1	Orange 2	Rouge
Indice de vulnérabilité I_v	13 - 49	49 - 87	87 - 136	136 - 196

- **Le niveau vert : $13 \leq I_v \leq 49$** : Le réservoir expertisé n'est pas vulnérable. L'ouvrage présente un bon comportement aux aléas naturels et ne nécessite pas une attention particulière après sa réalisation et sa mise en service. Seules les interventions ordinaires périodiques sont nécessaires.
- **Le niveau orange 1 : $49 \leq I_v \leq 87$** : Le comportement aux aléas naturels est assez bon. Le réservoir est moyennement vulnérable.
- **Le niveau orange 2 : $87 \leq I_v \leq 136$** : Le réservoir a une tenue et un comportement faible aux aléas naturels. Il présente une vulnérabilité assez élevée.
- **Le niveau rouge : $136 \leq I_v \leq 196$** : Le réservoir a une très faible tenue aux aléas donc une vulnérabilité très élevée. Par conséquent, le réservoir doit être mis hors service ou à défaut en situation de restriction d'utilisation, immédiatement.

2.6. Application de la méthode de l'indice de vulnérabilité - Etude de cas

En vue de l'application de la méthode d'indice de vulnérabilité, nous avons choisi d'expertiser un parc de 24 réservoirs de stockage d'eau potable dans deux daïras : Draa Ben Khedda et Larbaa Nath Irathen, et dans la commune de Mekla, rajoutés au parc de réservoir déjà expertisées par (Bouhadoun et al, 2011) dans la daïra de Larbaa Nath Irathen, pour avoir un total de 54 réservoirs (tableau 2.28).

Notons que la fiche d'enquête que nous avons utilisé, lors de notre expertise, est celle développée par (Bouhadoun et al, 2011). Un exemple de cette fiche renseignée est donnée en annexe 1 pour le cas du réservoir de Draa Ben Khedda.

Tableau 2.28 : Présentation des réservoirs expertisés.

Région d'étude (daïra)	Nom du site	code	Désignation des réservoirs
Larbaa Nath Irathen	Adnis	1	Réservoir Irdjen de capacité 150 m ³
	Ait hague	2	Réservoir Irdjen de capacité 100 m ³
	Ait halli	3	Réservoir Irdjen de capacité 100 m ³
	Ait yacoub	4	Réservoir Irdjen de capacité 150 m ³

	Boudjlil	5	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	Ibhlal	6	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	Mehriz	7	Réservoir Irdjen de capacité 100 m ³
	Mestigua	8	Réservoir Irdjen de capacité 50 m ³
	Monobloc1	9	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	Monobloc2	10	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	SR1	11	Réservoir Irdjen de capacité 1000 m ³
	SR2	12	Réservoir Irdjen de capacité 1000 m ³
	SR3	13	Réservoir Irdjen de capacité 100 m ³
	Taghanimt	14	Réservoir Irdjen de capacité 100 m ³
	Taksebt	15	Réservoir Irdjen de capacité 2000 m ³
	Tala amara	16	Réservoir Irdjen de capacité 200 m ³
	Tansaout	17	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	Tamazirt 1	18	Réservoir Irdjen de capacité 500 m ³
	Tamazirt 2	19	Réservoir Irdjen de capacité 200 m ³
	Zone insustrielle	20	Réservoir Irdjen de capacité 2 x 1500 m ³
	Ath ighil	21	Réservoir Irdjen de capacité 200 m ³
Draa Ben Khedda	Mouldioune village	22	Réservoir DBK de capacité 200 m ³
	Mouldioune zone	23	Réservoir DBK de capacité 1000 m ³
	Touaresse	24	Réservoir DBK de capacité 1000 m ³
	Touaresse	25	Réservoir DBK de capacité 1000 m ³
	SR1	26	Réservoir Sidi Naaman de capacité 1000 m ³
	SR2	27	Réservoir Sidi Naaman de capacité 1000 m ³
	chef lieu	28	Réservoir Sidi Naaman de capacité 200 m ³
	Maassal	29	Réservoir Sidi Naaman de capacité 1000 m ³
	Chef lieu 1	30	Réservoir Tadmait de capacité 1000 m ³
	Chef lieu 2	31	Réservoir Tadmait de capacité 1500 m ³
	kef laagab	32	Réservoir Tadmait de capacité 200 m ³
	Baghdad	33	Réservoir Tadmait de capacité 200 m ³
	Ait Saada (ouarezki)	34	Réservoir Tadmait de capacité 100 m ³
	Ait Saada bas	35	Réservoir Tadmait de capacité 200 m ³
	Ait Saada haut	36	Réservoir Tadmait de capacité 300 m ³
	Tighilt Tiguerfiouine	37	Réservoir Tadmait de capacité 1000 m ³
	Telta 1	38	Réservoir Tadmait de capacité 100 m ³
	Telta 2	39	Réservoir Tadmait de capacité 1500 m ³
	Adjaba	40	Réservoir Tirmatine de capacité 250 m ³
	Avarane 1	41	Réservoir Tirmatine de capacité 500 m ³
	Avarane 2	42	Réservoir Tirmatine de capacité 1500 m ³
	Herrouka 1	43	Réservoir Tirmatine de capacité 500 m ³
	Herrouka 2	44	Réservoir Tirmatine de capacité 100 m ³
	Ibhlal 1	45	Réservoir Tirmatine de capacité 100 m ³
	Ibhlal 2	46	Réservoir Tirmatine de capacité 200 m ³
	Megdoul 1	47	Réservoir Tirmatine de capacité 200 m ³

Mekla	Megdoul 2	48	Réservoir Tirimtine de capacité 500 m ³
	Menacera	49	Réservoir Tirimtine de capacité 100 m ³
	chef lieu 1	50	Réservoir Mekla de capacité 500 m ³
	chef lieu 2	51	Réservoir Mekla de capacité 200 m ³
	SRI Chaibe	52	Réservoir Mekla de capacité 500 m ³
	SR2 Djamaa N Saridj	53	Réservoir Mekla de capacité 500 m ³
	SR3 Djamaa N Saridj	54	Réservoir Mekla de capacité 1000 m ³

L'ouvrage qui fera l'objet d'une étude de cas est le réservoir N°22, implanté à Mouldiouane village, daïra Draa Ben Khedda. Ce réservoir circulaire posé au sol que nous avons expertisé en mars 2014 est de capacité 200 m³ (figure 2.4). Il a été réalisé en 1988.



Figure 2.4 : Vue générale du réservoir de Mouldiouane village N°21 (Photo MILOUDI, 2014).

2.6.1. Evaluation de la vulnérabilité du réservoir de Mouldiouane village à la mise en service en 1988

L'indice de vulnérabilité simulé au jour de la mise en service, en 1988, est illustré dans le tableau 2.29.

Tableau 2.29 : Indice de vulnérabilité au jour de la mise en service en 1988.

Paramètre	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
1	Montagne	1	Bande nord centre	3,00	3,00
2	Zone sismique IIa	2	Milieu rural	2,00	4,00
3	Sol meuble, type S3	3	Risque de glissement	4,00	12,00
4	Zone A	4	Toiture en forme de coupole	1,00	4,00
5	Zone de vent I	2	Ph = 0.75, Pc = 0.50, Pt = 1.00, Ps = 0.25.	2,50	5,00
6	Réservoir posé au sol	3	béton arme	3,00	9,00

7	Radier	2	Pas de tassement	1,00	2,00
8	classe B	2	Etanchéité satisfaisante	1,00	2,00
9	revêtement par enduit	2	Neuve, pas de désordres visibles, satisfaisante	1,00	2,00
10	Niveau 1	1	Réservoir âgé de 1 an	1,00	1,00
11	Réservoir de distribution	2	Accessible par route revêtue	1,00	2,00
12	Bâtiments du groupe 2	2	Capacité 200 m ³	1,00	2,00
13	Annuelle	4		1,00	4,00
Indice de vulnérabilité I_v					52,00

La valeur de l'indice de vulnérabilité ($49 \leq I_v = 52.00 \leq 87$) simulée au jour de la mise en service en 1988 classe le réservoir, en **orange 1**. Il présente une vulnérabilité moyenne aux différents aléas naturels ; celle-ci étant pénalisée par :

- sa nature de sol : il est de type meuble avec un risque de glissement,
- son environnement : le réservoir est non clôturé, et est situé à coté des habitations ce qui est sujette au vandalisme.

2.6.2. Evaluation de la vulnérabilité au jour de l'expertise (mars 2014)

a. Pathologies répertoriées

- *Etanchéité de la couverture*

Le complexe d'étanchéité de la couverture réalisé par un revêtement de type enduit, se trouve dans un état vétuste (figure 2.5, 2.6)



Figure 2.5 : Fut de l'étanchéité détérioré.



Figure 2.6 : Présence des terres et de la mauvaise herbe sur la toiture.

- *Etanchéité des parois*

L'étanchéité du réservoir est assurée par un revêtement de type enduit de ciment hydrofugé en couche épaisse supérieure à 2.5 mm (Hammoum, 2012). L'étanchéité du

réservoir est de classe B (ouvrage dont l'étanchéité est assurée par la structure, complétée par un revêtement d'imperméabilisation). Le degré de satisfaction de l'étanchéité est médiocre et ceci se traduit par la présence de plusieurs points de fuites et suintement autour de la paroi (figure 2.7), et par le développement de deux phénomènes sur la paroi qui sont : l'alcali réaction et efflorescence (figure 2.8).



Figure 2.7 : Fuite et suintement sur la paroi de l'ouvrage.



Figure 2.8 : Efflorescence sur la paroi de l'ouvrage.

- **Chambre des vannes**

L'expertise du réservoir a révélé les anomalies suivantes :

- vannes dégradées et mal entretenues (figure 2.9),
- chambre de vannes inondée par l'absence de système d'évacuation des eaux (figure 2.10),
- échelle extérieure pour accès à la coupole inexistante (figure 2.11),
- accès dans la chambre des vannes non sécurisé (figure 2.11).



Figure 2.9 : Vannes dégradées et mal entretenue.



Figure 2.10 : Chambre de vannes inondée.



Figure 2.11 : Accès dans la chambre des vannes non sécurisé et absence d'échelle pour l'accès à la coupole.

b. Défauts apparents

Les désordres observés sur le réservoir, après expertise visuelle, sont présentés sur les figures (2.12, 2.13, 2.14, 2.15) qui suivent :



Figure 2.12 : Eclatement du béton.



Figure 2.13 : Epaufrure et défaut d'enrobage des aciers avec perte de section et de résistance.



Figure 2.14 : Aciers dénudés et corrodés.



Figure 2.15 : Fissures et fuites au niveau de la paroi.

Selon la classification de Mathieu et au vu des défauts énumérés plus haut, nous déduisons que le réservoir expertisé est classé indice de gravité de niveau 3 (défauts spécifiques de gravité variable nécessitant un suivi et des investigations). Ces défauts traduisent de façons très nettes une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage.

- **Détermination de l'indice de vulnérabilité**

Nous donnons ci-après les paramètres de l'évaluation ayant subi des variations (tableau 2.30).

Tableau 2.30 : Calcul de l'indice de vulnérabilité au jour de l'inspection en mars 2014.

Paramètre	Note élémentaire	Nei	Coefficient de pondération	Pi	Nei . Pi
1	Montagne	1	Bande nord centre	3,00	3,00
2	Zone sismique IIa	2	Milieu rural	2,00	4,00
3	Sol meuble, type S3	3	Risque de glissement	4,00	12,00
4	Zone A	4	Toiture en forme de coupole	1,00	4,00
5	Zone de vent I	2	Ph = 0.75, Pc = 0,50, Pt = 1.00, Ps = 1.00.	3,25	6,50
6	Réservoir posé au sol	3	béton arme	3,00	9,00
7	Radier	2	Début d'évolution de tassement avec arrêt	2,00	4,00
8	classe B	2	Etanchéité insatisfaisante	4,00	8,00
9	revêtement par enduit	2	Moyennement satisfaisante	4,00	8,00
10	Niveau 3	3	Réservoir âgé de 26 ans	3,00	9,00
11	Réservoir de distribution	2	Accessible par route revêtue	1,00	2,00
12	Bâtiments du groupe 2	2	Capacité 200 m ³	1,00	2,00

13	Annuelle	4	1,00	4,00
Indice de vulnérabilité Iv				75,50

La valeur de l'indice de vulnérabilité obtenue après expertise [$49 < (I_v=75,50) < 87$] classe le réservoir expertisé toujours en **orange 1**. Il présente une vulnérabilité moyenne aux différents aléas naturels.

Par procédés analogue, nous avons déterminés les indices de vulnérabilité des différents réservoirs expertisés. Les résultats sont données ci-après (tableau 2.31) :

Tableau 2.31 : Résultats de l'indice de vulnérabilité des réservoirs expertisés.

			Note partiel												Iv	Niveau de gravité	
			Environnementale					Structurelle					Fonctionnelle				
Nom du site	Paramètres	code	Implantation de l'ouvrage	Zone sismique	Type de sol	Action de la neige	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage	Fréquence de l'entretien		
Adnis (Irdjen)		1	3	4	8	4	5.5	9	2	6	6	12	6	1	4	70.5	Niveau 3
Ait hague (Irdjen)		2	3	2	8	4	5	6	2	2	2	8	6	1	4	53	Niveau 2
Ait halli (Irdjen)		3	3	4	12	4	5.5	9	4	4	2	12	2	1	4	66.5	Niveau 3
Ait yacoub (Irdjen)		4	3	2	4	4	5	6	2	2	6	8	6	1	4	53	Niveau 2
Boudjlil (Irdjen)		5	3	2	3	4	6	9	2	4	2	6	6	1	4	52	Niveau 3
Ibhlal (Irdjen)		6	3	2	8	4	6.5	9	2	8	2	6	3	1	4	58.5	Niveau 3
Mehriz (Irdjen)		7	3	4	3	4	5.5	9	2	6	2	2	6	1	4	51.5	Niveau 2
Mestigua (Irdjen)		8	3	4	8	4	5.5	6	2	6	4	12	6	1	4	65.5	Niveau 3
Monobloc1 (Irdjen)		9	3	4	12	4	4	9	2	2	2	1	4	1	4	52	Niveau 1
Monobloc2 (Irdjen)		10	3	4	6	4	5	9	2	2	2	2	8	1	4	52	Niveau 2
SR1 (Irdjen)		11	3	4	8	4	6.5	9	2	6	2	6	4	2	4	60.5	Niveau 3
SR2 (Irdjen)		12	3	4	8	4	6	9	2	2	2	2	4	2	4	52	Niveau 1
SR3 (Irdjen)		13	3	2	8	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1	4	52.5	Niveau 2
Taghanimt (Irdjen)		14	3	4	8	4	5.5	9	2	2	8	12	2	1	4	64.5	Niveau 3
Taksebt (Irdjen)		15	3	4	4	4	6.5	9	2	4	2	6	1	2	4	51.5	Niveau 3
Tala amara (Irdjen)		16	3	4	4	4	5	9	2	2	2	6	2	1	4	48	Niveau 2
Tansaout (Irdjen)		17	3	2	4	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1	4	48.5	Niveau 2
Tamazirt 1 (Irdjen)		18	3	4	4	4	5	6	2	2	8	8	6	1	4	57	Niveau 2
Tamazirt 2 (Irdjen)		19	3	4	3	4	6	9	2	6	2	2	4	2	4	51	Niveau 2
Zone insutrielle (Irdjen)		20	3	2	12	4	6	9	2	4	12	12	6	3	4	79	Niveau 3
Ath Ighil (Irdjen)		21	3	4	8	4	6	9	2	6	2	12	6	1	4	67	Niveau 3
Mouldioune village (DBK)		22	3	4	12	4	6.5	9	4	8	8	9	2	2	4	75.5	Niveau 3
Mouldioune zone (DBK)		23	3	4	8	4	5.5	9	2	2	2	3	4	4	4	545	Niveau 3
Touaresse (DBK)		24	3	8	12	4	5.5	9	2	6	4	12	2	6	4	77.5	Niveau 3
Touaresse (DBK)		25	3	8	12	4	6	9	4	2	4	8	2	6	4	72	Niveau 2
SR1 (Sidi Naaman)		26	3	4	12	4	5.5	9	2	4	2	4	2	4	4	59.5	Niveau 2
SR2 (Sidi Naaman)		27	3	4	12	4	5.5	9	2	2	2	2	1	4	4	54.5	Niveau 1
chef lieu (Sidi Naaman)		28	3	4	12	4	5.5	9	2	8	4	12	2	2	4	71.5	Niveau 3

Chapitre 2 : Evaluation de la vulnérabilité des réservoirs en béton vis-à-vis de certains aléas naturels, par une approche par expertise

Maassal (Sidi Naaman)	29	3	4	8	4	6	9	2	4	8	4	4	4	4	64	Niveau 1
Chef lieu 1 (Tadmait)	30	3	8	12	4	4.5	6	2	6	6	9	4	6	4	74.5	Niveau 3
Chef lieu 2 (Tadmait)	31	3	8	12	4	5	6	2	6	2	3	2	6	4	63	Niveau 3
kef laagab (Tadmait)	32	3	4	12	4	5	9	2	6	6	9	6	2	4	72	Niveau 3
Baghdad (Tadmait)	33	3	4	12	4	4	6	2	4	4	9	2	2	4	60	Niveau 3
Ait Saada ouarezki (Tadmait)	34	3	4	12	4	5	9	2	6	6	9	2	2	4	68	Niveau 3
Ait Saada bas (Tadmait)	35	3	2	8	4	6	6	2	4	6	9	4	2	4	60	Niveau 3
Ait Saada haut (Tadmait)	36	3	2	8	4	5.5	9	4	2	2	1	4	2	4	50.5	Niveau 1
Tighilt Tiguerfiouine (Tadmait)	37	3	4	8	4	5	9	2	6	4	9	4	4	4	66	Niveau 3
Telta 1 (Tadmait)	38	3	4	12	4	5.5	9	2	6	4	9	8	2	4	72.5	Niveau 3
Telta 2 (Tadmait)	39	3	4	12	4	5.5	9	2	4	2	2	8	6	4	65.5	Niveau 2
Adjaba (Tirmitine)	40	3	4	4	4	5.5	9	2	4	6	12	2	2	4	61.5	Niveau 3
Avarane 1 (Tirmitine)	41	3	4	12	4	5.5	9	2	2	12	12	4	2	4	75.5	Niveau 3
Avarane 2 (Tirmitine)	42	3	4	12	4	5	6	2	6	2	3	4	6	4	61	Niveau 3
Herrouka 1 (Tirmitine)	43	3	4	4	4	6	9	2	6	4	12	4	4	4	66	Niveau 3
Herrouka 2 (Tirmitine)	44	3	4	4	4	5.5	9	2	4	4	8	3	2	4	56.5	Niveau 2
Ibhlal 1 (Tirmitine)	45	3	4	8	4	5	9	2	4	4	4	4	2	4	57	Niveau 2
Ibhlal 2 (Tirmitine)	46	3	4	8	4	5	9	2	2	2	1	2	2	4	48	Niveau 1
Megdoul 1 (Tirmitine)	47	3	4	4	4	5.5	9	2	4	4	1	8	4	4	56.5	Niveau 1
Megdoul 2 (Tirmitine)	48	3	4	4	4	5.5	9	2	4	2	3	1	4	4	49.5	Niveau 3
Menacera (Tirmitine)	49	3	4	8	4	5.5	9	2	4	2	2	2	2	4	51.5	Niveau 2
chef lieu 1 (Mekla)	50	3	8	12	4	5	6	2	4	2	12	4	3	4	69	Niveau 3
chef lieu 2 (Mekla)	51	3	6	12	4	4.5	3	2	4	2	12	4	3	4	63.5	Niveau 3
SRI Chaibe (Mekla)	52	3	4	12	4	5.5	9	2	6	4	12	4	2	4	71.5	Niveau 3
SR2 Djamaa N Saridj (Mekla)	53	3	4	8	4	5	6	2	4	4	12	4	2	4	62	Niveau 3
SR3 Djamaa N Saridj (Mekla)	54	3	4	8	4	5.5	9	2	4	6	9	3	4	4	65.5	Niveau 3

Conclusion

La méthodologie à base d'indice, présentée dans ce chapitre, permet une évaluation simplifiée et rapide de la vulnérabilité des réservoirs en béton armé, comme nous l'avons montré à travers l'expertise d'un parc de 54 réservoirs dans la wilaya de Tizi-Ouzou.

Pour une analyse plus poussée des paramètres d'analyse, nous proposons une méthode statistique dite ACP ; pour explorer les liaisons existantes entre ces différents paramètres afin de mieux apprécier cette vulnérabilité. C'est ainsi que nous consacrons le chapitre qui suit à l'exposé de cette méthode.

Chapitre 3

Exposé de la méthode ACP

Introduction

Les méthodes multifactorielles permettent d'obtenir des représentations graphiques qui constituent le meilleur résumé possible de l'information contenue dans un grand tableau de données. Pour cela, il faut consentir à une perte d'information afin de gagner en lisibilité. En fonction des phénomènes que l'on veut étudier et de la nature du tableau de données dont on dispose, on appliquera telle ou telle méthode multifactorielle (ACP, AFC, ACM...etc.). En effet, il n'existe pas une méthode factorielle d'analyse des données, mais un ensemble de méthodes, reposant toutes sur les mêmes théories mathématiques.

Dans le cadre de cette étude, nous nous basons sur la méthode ACP pour analyser les 13 paramètres définis dans la méthode de l'indice de vulnérabilité exposée au 2^{ème} chapitre, afin de définir les corrélations existantes entre ces derniers pour éviter la redondance. À l'échelle d'un parc de réservoir expertisé, celle-ci nous permettra de ressortir les ressemblances existantes entre les différents individus (réservoirs).

C'est ainsi que nous consacrons ce troisième chapitre à la présentation de la méthode et l'interprétation des résultats de ce dernier.

3.1. Définition

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) fait partie du groupe *des méthodes descriptives multidimensionnelles* appelées *méthodes factorielles*, qui 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.

Il s'agit d'une approche à la fois géométrique (les variables étant représentées dans un nouvel espace, selon des directions **d'inertie maximale**) et statistique (la recherche portant sur des axes indépendants expliquant au mieux la variabilité (**la variance**) des données). Lorsqu'on veut **compresser** un ensemble de **p** variables aléatoires, les **q premiers axes** de l'analyse en composantes principales sont un **meilleur choix**, du point de vue de l'inertie ou de la variance.

L'A.C.P. permet d'explorer les liaisons entre variables et les ressemblances entre individus.

3.2. Historique

L'analyse en composantes principales est la plus utilisée des analyses multivariées. C'est aussi la plus ancienne. Ses fondements datent de 1901 quand *Karl PEARSON* en a conçu les idées essentielles à deux dimensions (Benzékri, 1973). Il prolonge ses travaux dans le domaine de la régression et des corrélations entre plusieurs variables. Pearson utilise ces corrélations non plus pour expliquer une variable à partir des autres (comme en régression), mais pour décrire et résumer l'information contenue dans ces variables.

Sa généralisation a été faite en France en 1933 par *Harold HOTELLING* qui en a fait une première publication sous forme actuelle à plusieurs dimensions. Elle a attendu les ordinateurs vers les années 1960 pour être mise en pratique par *J-P Benzékri* (Duby et al, 2006).

3.3. Champs d'application

Les champs d'application sont aujourd'hui multiples, allant de la *biologie* à la *recherche économique et sociale*, et plus récemment le *traitement d'images*. L'ACP est majoritairement utilisée pour :

- l'étude et la visualisation des corrélations entre les variables, afin éventuellement de limiter le nombre de variables à mesurer par la suite ;
- l'obtention de *facteurs non corrélés* qui sont des *combinaisons linéaires des variables de départ*, afin d'utiliser ces facteurs dans des méthodes de modélisation ; telles que la régression linéaire, la régression logistique ou l'analyse discriminante ;
- la visualisation des observations dans un espace à deux ou trois dimensions, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations, ou au contraire des observations atypiques.

3.4. Logiciels d'application

Les logiciels utilisant la méthode ACP sont : XLSTAT[®], StatBox[®], SPSS[®] et R[®]. Ils permettent de réaliser diverses analyses factorielles. Les données sont gérées à partir du logiciel Microsoft Excel[®] et les sorties s'effectuent dans des feuilles de calculs Excel[®].

❖ Remarque

Pour l'application d'une ACP, il faut s'assurer que les données sont quantitatives. Dans la pratique, on considère souvent les variables qualitatives comme des quantitatives. Par exemple, dans les enquêtes de satisfaction les variables qualitatives ordinales possèdent les modalités suivantes :

Pas du tout satisfait ; plutôt pas satisfait ; moyennement satisfait ; plutôt satisfait ; Tout à fait satisfait. On considère que ces modalités correspondent à une note donnée par l'individu avec 1 pour pas du tout satisfait, 2 pour plutôt pas satisfait ...etc. Et on obtient ainsi une variable quantitative discrète que l'on pourra utiliser en ACP.

En pratique on s'autorise une certaine liberté d'interprétation qui n'a pas de fondement statistique. En effet, 4 est supérieur à 2, ce qui traduit bien que « plutôt satisfait » indique une satisfaction supérieure à « plutôt pas satisfait ». Mais, mathématiquement, 4 est le double de 2 ; et rien ne justifie le fait que « plutôt satisfait » traduise une satisfaction deux fois plus importante que « plutôt pas satisfait ».

L'ACP ne sait pas traiter les données manquantes et les valeurs identiques. Certains logiciels proposent de supprimer les individus possédant des données manquantes ou des valeurs identiques, alors que d'autres vont remplacer la donnée manquante par un zéro.

3.5. Données d'une ACP

L'ACP s'intéresse à des tableaux de données rectangulaires avec des individus en lignes et des variables quantitatives en colonnes (tableau 3.1). L'ACP vise à décrire graphiquement un tableau de données d'individus n avec leurs variables quantitatives p de grande taille :

Tableau 3.1: Représentation type d'un tableau A.C.P.

Individus/ Variables	Var ₁ ...var _j ...Var _p
Ind ₁	X _{ij}
.	
.	
Ind _i	
.	
.	
ind _n	

Un tel tableau de données sera tout simplement une matricée réelle à n lignes (les individus) et à p colonnes (les variables) (formule 3.2) :

$$X = (x_{ij})_{\substack{i=1 \dots n; \\ j=1 \dots, q \dots, k \dots, p}} \quad (3.1)$$

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.6. Objectif d'une ACP

On dispose d'un tableau de données X_{ij} . On peut interpréter géométriquement les lignes et les colonnes du tableau de données par des points dans deux espaces différents : l'espace des individus (figure 3.1) **et/ou** l'espace des variables (figure 3.2).

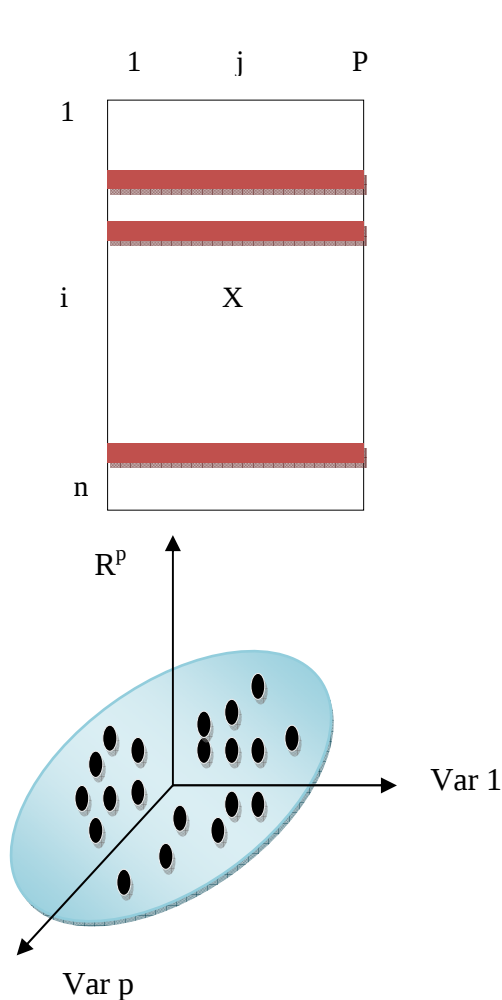


Figure 3.1 : Espace des individus (Husson, 2009).

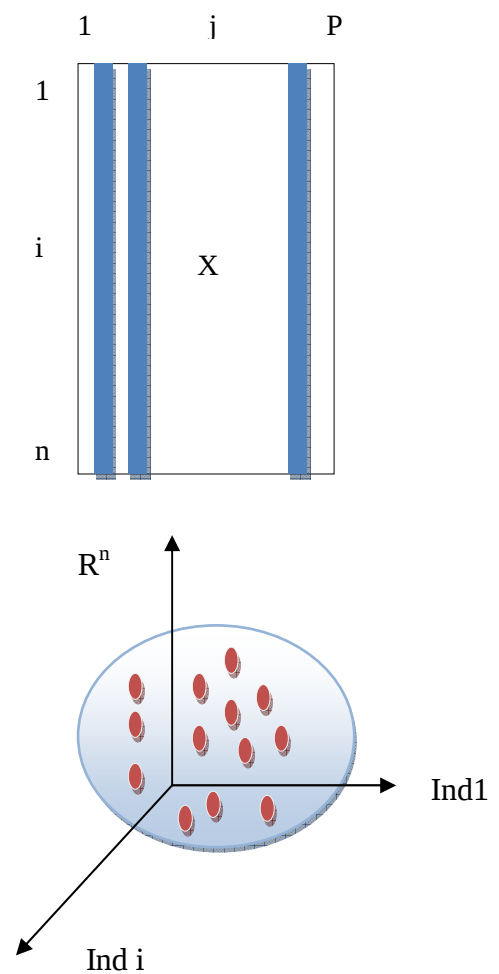


Figure 3.2 : Espace des variables (Husson, 2009).

- **l'espace des individus**

Dans l'espace des individus (figure 3.1), les axes représentent les variables et les individus sont représentés comme un nuage de points d'un ensemble d'individus. Etudier les individus

revient à considérer ce nuage de points dans un espace à R^p , avec p le nombre de variables ; cela revient à étudier les lignes du tableau 3.1.

Dans l'espace des individus, chacun de ces derniers est représenté par un point et l'ensemble forment ainsi un nuage de points. Le but de l'ACP est de visualiser ce nuage dans un espace de faible dimension le plus fidèlement possible.

Nous identifierons l'individu i avec le point ligne $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$ 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. Pour faire une représentation géométrique, il faut choisir une distance entre deux points de l'espace.

1 individu = une ligne du tableau $\Rightarrow$ un point dans un espace à p dimensions

- Si $j=1$: on a une représentation axiale ;
- Si $j=2$: on peut construire un nuage de point avec la régression simple ;
- Si $j=3$: on peut avoir une représentation plus difficile en 3 dimensions ;
- Si $j=4$: impossible à représenter mais le concept est simple ; pour cela on doit définir la notion de ressemblance.

On peut dire que deux individus se ressemblent s'ils sont proches, et la ressemblance entre deux individus est mesurée par la distance euclidienne.

La distance utilisée par l'ACP dans l'espace R^p à p dimensions ou sont représentés les unités, est la distance euclidienne classique. La distance euclidienne entre deux individus e_i et $e_{i'}$ (figure 3.3) s'écrit :

$$d^2(e_i, e_{i'}) = \sum_{j=1}^p (x_i^j - x_{i'}^j)^2 \quad (3.3)$$

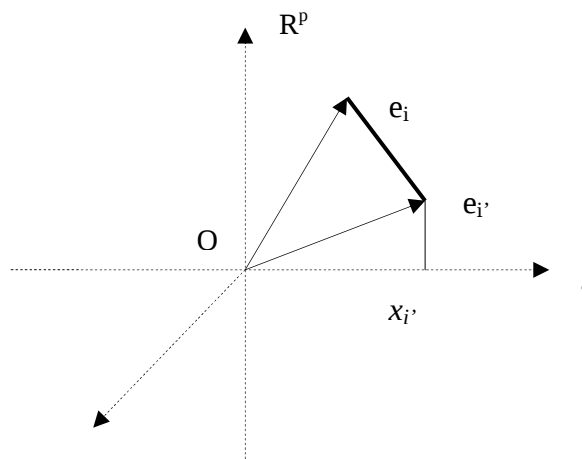


Figure 3.3 : Nuage des individus (Husson et al, 2009).

Deux points sont très proche si les p coordonnées de ces deux points sont très proche (mêmes valeurs pour ces différentes variables).

❖ Remarque

Pour permettre de donner à chaque individus la même importance dans le calcul de la distance, on suppose que tous les individus ont le même poids et il est égale a $\frac{1}{n}$;

Chaque individu i est muni d'un poids tel que $p_i > 0$ et $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ (3.4)

Dans le cas le plus usuel de poids égaux, la matrice diagonale des poids $D = \frac{1}{n} I$ (3.5)

Où I est la matrice identité.

$$D = \text{diag}(p_i) = \begin{pmatrix} p_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & p_n \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

• l'espace des variables

Dans l'espace des variables (figure 3.2), les axes représentent les individus et les variables sont représentés comme un nuage de points d'un ensemble de variables. Etudier les variables revient à considérer ce nuage de point dans un espace à R^n , avec n le nombre d'individu; cela revient à étudier les colonnes du tableau 3.1.

Les p colonnes peuvent être considérées comme p points dans un espace vectoriel à n dimensions dans R^n . Cet espace est appelé **l'espace des variables**.

Si les valeurs prises par deux variables sont très voisines pour l'ensemble des individus, ces variables seront présentées 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 :

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (3.7)$$

Et son écart type par :

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_j)^2} \quad (3.8)$$

On peut alors définir la corrélation entre les variables, cela revient à étudier la forme du nuage.

Le cosinus de l'angle formé par 2 variables (figure 3.4) est égal au coefficient de corrélation linéaire entre ces variables :

$$\cos(\alpha) = \frac{\langle \vec{o_l}, \vec{o_k} \rangle}{\|\vec{o_l}\| \|\vec{o_k}\|} = \frac{\sum_{j=1}^p x_{il}^j x_{ik}^j}{\sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{il}^j)^2} \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ik}^j)^2}} = r(x_i^j, x_{i'}^j) \quad (3.9)$$

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

$$r_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{\text{var}(x)} \sqrt{\text{var}(y)}} = \cos(x, y) \quad (3.10)$$

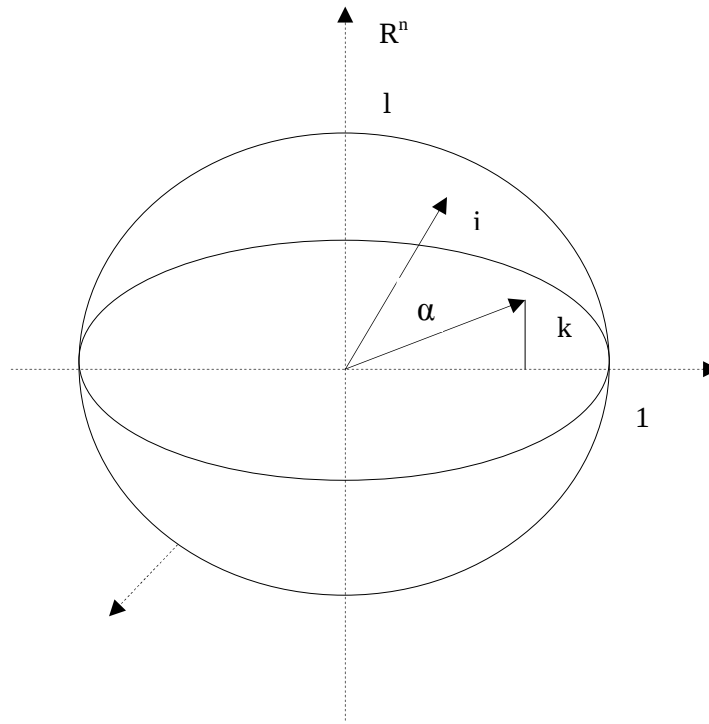


Figure 3.4 : Nuage des variables (Husson et al, 2009).

3.6.1. Problématique

Difficulté à mettre en évidence les relations globales existantes entre les variables dès que $p > 3$, et les ressemblances entre individus dès que $n > 3$, car impossibles de les visualiser.

Lorsqu'il n'y a que deux dimensions (largeur et longueur par exemple), il est facile de représenter les données sur un plan :



Figure 3.5 : Représentation du nuage à deux dimensions

Avec trois dimensions (largeur, hauteur et profondeur par ex.), c'est déjà plus difficile :



Figure 3.6 : Représentation du nuage à trois dimensions

3.6.2. Solution

Condenser l'information du tableau de manière à retirer les relations vraiment caractéristiques (proximités entre variables et individus), ceci **en limitant la perte d'information**. C-à-d déterminer un sous-espace de **dimension** $q < p$ (q nouveaux axes) (ou $q < n$), sur lequel **projeter** les nuages de points relatifs au tableau de données qui soit :

- « **compréhensible** » par l'œil : q faible, de préférence $q=1,2$ ou 3 ;
- **le moins déformant possible (projection la plus fidèle possible)**

Ce sous-espace est appelé **espace factoriel du nuage**.

L'obtention des q nouveaux axes nous permettra de travailler sur une image réduite du nuage du point de départ. Et c'est cette image réduite donc beaucoup plus accessible à notre observation que nous examinerons pour décrire et analyser les données du tableau initial.

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

On effectue un changement de repère, passant du repère défini par les p variables à un repère de dimension p **le moins déformant possible** pour le nuage. Il sera défini par p nouveaux axes, appelés *axes factoriels* ou *axes principaux*.

On retient ensuite les q premiers axes du nouveau repère, ce qui nous donnera l'espace factoriel de dimension q . Il permet de récupérer les liens les plus significatifs contenus dans le tableau.

Les p axes factoriels sont définis séquentiellement :

- On détermine l'axe (premier axe factoriel) sur lequel le nuage se déforme le moins possible en projection, c à d le premier axe factoriel est donc l'axe selon lequel est préservé, par projection, le maximum de la dispersion initiale des points du nuage.
- On cherche un second axe, sur lequel le nuage se déforme le moins en projection, après le premier axe, tout en étant **orthogonal au premier**,
- On réitère jusqu'à l'obtention de p axes.

Un facteur est une variable composite fabriquée à partir des variables d'origine; il s'exprime comme combinaison linéaire des anciennes variables. Le 1er axe factoriel correspond à la variable composite qui différencie le mieux les individus.

a. Comment obtenir une déformation minimale ?

Chacune des n lignes du tableau X peut être considérée comme un vecteur, ou encore un point de $\mathbb{R}^p$. L'ensemble du tableau constitue alors un nuage de n points.

L'ACP vise à fournir une image simplifiée du nuage de point qui soit la plus fidèle possible. Elle permet d'avoir une idée sur les distances entre individus, cela revient à trouver un sous espace qui résume le mieux les données, c.-à-d. une image est bonne si elle restitue le plus fidèlement possible le nuage originale.

Pour avoir une bonne qualité d'une image il faut :

- restituer le plus fidèlement la forme générale du nuage. Les points doivent être bien séparé pour permettre de visualiser les distances entre les individus, donc cela revient à augmenter la dispersion, i.e. la variabilité (l'inertie), du nuage ;
- ne pas perturber les distances entre individus.

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

Le point o correspondant au vecteur de coordonnées toutes nulles n'est pas forcément une origine satisfaisante, car si les coordonnées des points du nuage des individus sont grandes, le nuage est éloigné de cette origine. Il apparaît plus judicieux de choisir une origine liée au nuage lui-même: **le centre de gravité du nuage** (figure 3.5), cela va permettre au nuage d'être plus dispersé.

Le centre de gravité G du nuage des individus est alors le point dont les coordonnées sont les valeurs moyennes des variables :

$$G = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n X_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i1} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ip} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{.1} \\ \vdots \\ x_{.j} \\ \vdots \\ x_{.p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \overline{X_{.1}} \\ \vdots \\ \overline{X_{.2}} \\ \vdots \\ \overline{X_{.3}} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Comme nous considérons chaque variable, comme chaque individu, ayant le même poids, G a alors pour coordonnées dans le repère : $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$

$$\vec{OG} = \begin{pmatrix} \overline{X_{.1}} \\ \vdots \\ \overline{X_{.j}} \\ \vdots \\ \overline{X_{.p}} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Sous forme graphique :

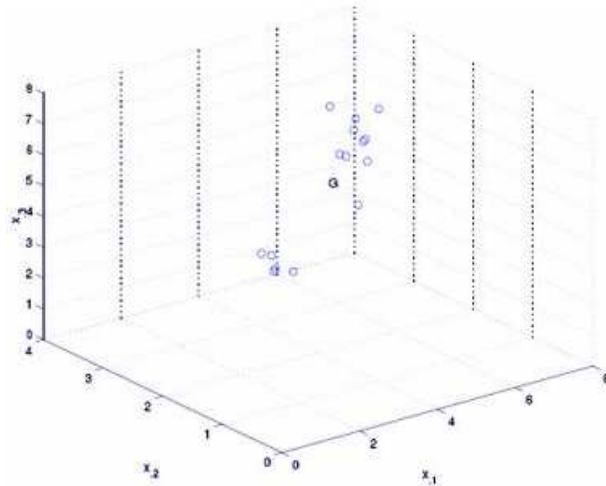


Figure 3.7 : Représentation de G dans le repère $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ (Duby et al, 2008).

Prendre G comme origine, conformément à la figure précédente, revient alors à travailler sur le tableau des données centrées :

$$X_c = \begin{bmatrix} x_{11} - x_{.1} & \cdots & x_{1j} - x_{.j} & \cdots & x_{1p} - x_{.p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} - x_{.1} & \cdots & x_{ij} - x_{.j} & \cdots & x_{ip} - x_{.p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} - x_{.1} & \cdots & x_{nj} - x_{.j} & \cdots & x_{np} - x_{.p} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Centrer les données ne modifie pas la forme du nuage, ça revient juste à translater le nuage vers une autre origine qui est le centre de gravité du nuage.

Remarque: La matrice des données centrées contient les coordonnées centrées (que nous noterons X_{cij}) des individus dans le repère $(G, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$. Nous nous placerons dans la suite toujours dans ce repère pour le nuage de points des individus et nous prendrons $O=G$ (figure 3.6)

Et sous forme graphique :

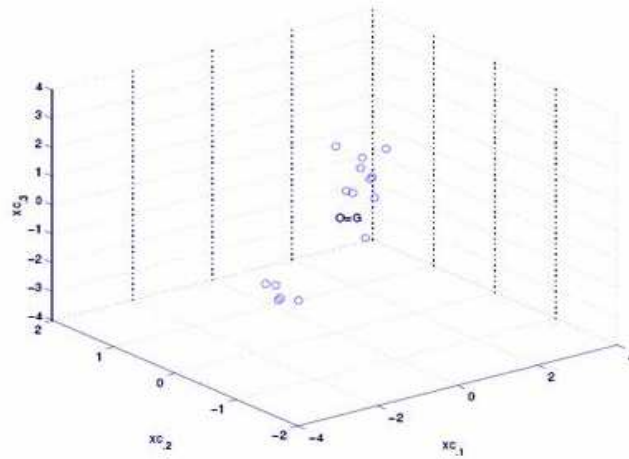


Figure 3.8 : Représentation des variables centrées dans le repère $(G, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ (Duby et al, 2008).

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

On quantifie la qualité d'une image avec la notion de dispersion ou de **variabilité** appelé **inertie** (formules (3.14), (3.15)) qui n'est autre que la mesure des dispersions, qui est l'équivalent d'une **variance** (formule (3.11)) mais généralisé à plusieurs dimensions. Si cette **inertie est grande**, cela signifie que le nuage est **très dispersé**, tandis que si elle **est petite**, alors le nuage est très **concentré sur son centre de gravité**.

a.2.1. détermination de la matrice de variance – covariance

Avant de déterminer le plan factoriel, nous allons chercher à détecter les liens possibles entre les variables, pour cela nous devons déterminer la matrice variance-covariance afin de connaître la variabilité du nuage.

Nous rappelons que la variance et la covariance entre deux variables et est donnée par :

$$\text{Var}_x = \sigma_x^2 \quad (3.14)$$

Et

$$\text{COV}_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{X} \bar{Y} \quad (3.15)$$

Soit X_c la matrice des données centrées. Pour avoir la matrice des variances covariances nous allons pré-multiplier la matrice des données centrées par sa transposée. La somme des éléments de la diagonale principale (des variances), la trace par définition, représente l'inertie du nuage de points (formule 3.16).

La matrice des variances - covariances est égale à :

$$V = \frac{1}{n} X_c^t X_c = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} var x_1 & cov(x_1, x_2) \cdots cov(x_1, x_p) \\ \vdots & \vdots \\ cov(x_2, x_1) & var x_2 \cdots cov(x_2, x_p) \\ \vdots & \vdots \\ cov(x_n, x_1) & cov(x_n, x_2) \cdots var x_p \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Nous voyons facilement que la matrices des covariances et au coefficient 1/n près de la matrice des produit scalaires canoniques des vecteurs de la matrice des données centrées (en d'autres termes, chaque composante de la matrice des covariances est égale au produit scalaire des variables centrées).

a.2.2. Calcul de l'inertie totale du nuage des individus

On note I_G le moment d'inertie du nuage des individus par rapport au centre de gravité G :

$$I_G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2(G, u_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{.j})^2 \quad (3.17)$$

Ce moment d'inertie totale est intéressant car c'est une mesure de la dispersion du nuage des individus par rapport à son centre de gravité.

Remarque :

On peut voir, en inversant l'ordre des signes sommes, que I_G peut aussi s'écrire sous la forme suivante :

$$I_G = \sum_{j=1}^p \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_{.j})^2 \right] = \sum_{j=1}^p Var(v_j) \quad (3.18)$$

Ou $Var(v_j)$ 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 :

$$I_G = trace(V) = \sum_{i=1}^p v_i = \sum_{i=1}^p \lambda_i \quad (3.19)$$

Avec λ_i les valeurs propres de la matrice des variances-covariances :

$$\det(V - \lambda I) = 0 \quad tq \quad \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \quad (3.20)$$

Une valeur propre représente la variance des individus sur l'axe correspondant.

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

Chaque axe factoriel k , de vecteur directeur u_k , représente une nouvelle variable C_k de dimension p (figure 3.7), construite comme combinaison linéaire des variables (axes) de départ, appelée *composante principale* (formule (3.21)). La coordonnée C_{ik} d'un individu i donné sur cet axe correspond à la valeur de la composante principale prise par cet individu.

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 (c'est-à-dire celle qui ont la plus grande variance). Les axes qu'elles déterminent sont des *axes principaux* (formules (3.18)) et les formes linéaires associées sont des *facteurs principaux*.

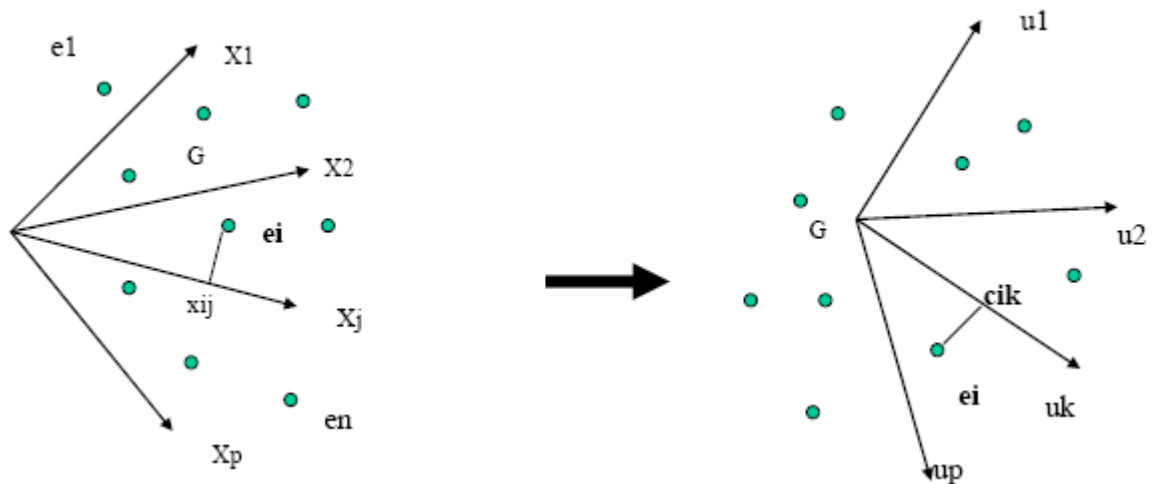


Figure 3.9 : Construction d'un espace factoriel (Duby et al, 2008).

Pour pouvoir trouver la meilleure image approchée du nuage, il faut que l'axe sur lequel on projette le nuage permette une dispersion maximale, 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

➤ Ajustement du nuage des individus

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

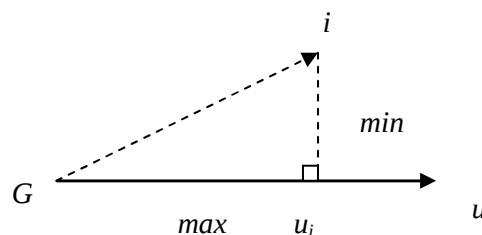


Figure 3.10 : Ajustement d'un individu i (Husson, 2009).

Pour trouver l'axe factoriel (facteur) qui déforme le moins possible le nuage, il faut que la distance $\overrightarrow{Gu_i}$ soit grande ;

Donc : $(Gu_i)^2$ grand $\leftrightarrow (iu_i)^2$ Petit avec $u_i \in$ axe (Pythagore) $\Rightarrow$ On doit maximiser la somme $\sum_i (Gu_i)^2$;

- maximiser $\sum_i (Gu_i)^2$ revient à trouver le meilleur plan, avec $u_i \in$ plan (donc la dispersion soit la plus grande possible).

Le meilleur plan contient le meilleur axe factoriel: pour trouver le meilleur plan on doit trouver le meilleur axe et ensuite trouver un axe orthogonale au premier axe ($u_1 \perp u_2$) et qui **maximise l'inertie** projetée $\sum_i (Gu_i)^2$;

- Puis on cherche un 3^{ème} axe, orthogonale au deux premiers et d'inertie maximum.

➤ calcul numérique des axes principaux

On appelle axes principaux d'inertie les axes de direction des vecteurs propres.

Un vecteur dit « vecteur propre » par une application linéaire si l'application ne fait que modifier 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 :

$$(V - \lambda I_n) \begin{pmatrix} x' \\ x'' \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Tel que V est la matrice des variances-covariances.

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

La sélection du nombre d'axes à retenir est une étape importante d'une ACP. Les critères utilisés sont en général empiriques : la méthode du coude qui consiste à détecter un coude sur le diagramme des valeurs propres, ou le critère de Kaiser. Ce dernier consiste à ne retenir que les valeurs propres supérieures à la moyenne ; et lorsqu'on est dans une ACP normée la somme des valeurs propres est égale au nombre p de ces valeurs propres, et la moyenne des valeurs propres est donc égale à 1. On ne retiendra donc par le critère de Kaiser que les valeurs propres supérieures à 1.

a.3.3. Pourcentage d'inertie expliquée

Le pourcentage de variance expliquée par les axes factoriels retenus est obtenu par la somme de leurs valeurs propres divisée par la trace. Cette valeur permet d'évaluer en quelque sorte la quantité d'information initiale recueillie par chaque axe.

Le % d'inertie (ou "variance" du nuage ou "dispersion") expliquée par un axe factoriel

$$\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100 \quad (3.22)$$

Elle mesure la part d'inertie expliquée par l'axe u_i

a.3.4. Détermination des composantes principales

La matrice de variance-covariance est diagonalisée. Les lignes et colonnes de cette matrice correspondent à de nouvelles variables appelées composantes principales ;

A chaque axe est associée une composante principale.

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

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

Pour obtenir ces coordonnées, on écrit que chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales de la forme :

Pour $i=1$

$$c^1 = x_1^1 u_1^1 + x_2^1 u_1^2 + \dots + x_p^1 u_1^n \quad (3.23)$$

Les composantes principales forment le vecteur :

$$C = \begin{pmatrix} c^1 \\ c^2 \\ \vdots \\ c^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & \dots & x_p^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & \dots & x_p^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ x_1^n & x_2^n & \dots & \dots & x_p^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1^1 & u_2^1 & \dots & \dots & u_p^1 \\ u_1^2 & u_2^2 & \dots & \dots & u_p^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ u_1^n & u_2^n & \dots & \dots & u_p^n \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Tel que :

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

Et

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

On a :

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

Donc les variables des composantes principales forment une matrice $C = X \Delta$ (3.25)

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

1^{er} composante c^1 variance : λ_1

2^{eme} composante c^2 variance : λ_2

3^{eme} composante c^3 variance : λ_3

Ces p composantes principales C^i s'expriment comme combinaison linéaire des anciennes variables. Elles sont telles que la somme des carrés de leurs corrélations avec les anciennes variables soit maximum.

Les composantes principales sont non corrélées deux à deux

En effet, les axes associés sont orthogonaux. Des graphes sont alors dessinés croisant les composantes principales, tant pour les variables que pour les individus, séparément car l'interprétation ne suit pas les mêmes principes. Les graphes des variables comprennent le cercle des corrélations.

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

Même règle 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 identique à ceux obtenu par l'ajustement de l'ensemble des individus.

3.7. Analyse en composantes principales normée

Dans les paragraphes précédents, nous avons étudié une ACP simple, pour laquelle, non seulement tous les individus ont le même poids dans l'analyse, mais aussi, toutes les variables sont traitées de façon symétrique (on leur fait jouer le même rôle) et les nouveaux axes sont issus de la matrice de variance-covariance empirique des variables (formule (3.13)). Cela pose parfois des problèmes. Le premier reproche fait par des praticiens est que, si les variables initiales sont hétérogènes, comme par exemple des poids, des tailles et des âges. Quel sens peut-on donner aux composantes principales qui sont alors des combinaisons linéaires de variables hétéroclites ? Le deuxième reproche, est que si on change d'unités sur ces variables, on peut changer complètement les résultats de l'ACP. Le dernier reproche vient du fait qu'une variable contribuera d'autant plus à la confection des premiers axes, que sa variance est forte.

Pour échapper à tous ces problèmes, on cherche à *normaliser* les variables et à travailler sur des variables *sans dimension*. Il y a plusieurs façons de normaliser les variables, mais la plus couramment utilisée est celle qui consiste à diviser les valeurs des variables par leur écart-type, c'est-à-dire que l'on travaille sur des variables *centrées et réduites*.

Centrer les données revient à travailler sur des variables sans unité, et la réduction permet d'accorder la même importance à chaque variable, ne pas réduire permet de donner plus d'importance aux variables qui ont une variabilité plus grande (une variance plus grande). C'est-à-dire l'opération de réduction diminue l'importance des variables les plus dispersées, elle peut inversement, augmenter l'importance des variables peu dispersées ! A la limite, une variable qui aurait à peu près la même valeur pour tous les individus (donc avec un écart-type faible) se verrait attribuer le même poids que les autres variables alors que le bon sens nous obligerait à l'éliminer.

3.7.1. Matrice des données centrées réduites

. La matrice des données centrées réduites (sans dimensions) est alors :

$$Y = \begin{bmatrix} (x_{11} - x_{.1})/\sigma_1 & \cdots & (x_{1j} - x_{.j})/\sigma_j & \cdots & (x_{1p} - x_{.p})/\sigma_p \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (x_{i1} - x_{.1})/\sigma_1 & \cdots & (x_{ij} - x_{.j})/\sigma_j & \cdots & (x_{ip} - x_{.p})/\sigma_p \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ (x_{n1} - x_{.1})/\sigma_1 & \cdots & (x_{nj} - x_{.j})/\sigma_j & \cdots & (x_{np} - x_{.p})/\sigma_p \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

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

$$D_{1/\sigma} = \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/\sigma_p \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Nous avons alors :

$$Y = X_c D_{1/\sigma} \quad (3.28)$$

Remarque:

Dans le cas où les variables sont centrées réduites, la moyenne de la variable $y_{.j}$ est nulle et donc sa variance est alors 1 (ce qui revient à dire que la norme de la variable centrée réduite est de norme unitaire)

3.7.2. Matrice de corrélation

La matrice des corrélations des variables initiales permet de voir si l'analyse peut être globalement possible. En effet, une des conditions de mise en œuvre est que les variables initiales soient corrélées, sinon, le nombre de dimensions ne peut-être réduit. On ne peut résumer que ce qui est partiellement redondant et lié. Il faut donc qu'un maximum de valeurs de la matrice des corrélations soit proche de 1 en valeur absolue.

Pour avoir la matrice de corrélation nous allons pré-multiplier la matrice des données centrées réduite par sa transposée ; on aura alors :

$$R = \frac{1}{n} Y_c^t Y_c = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & cor(x_1, x_2) \cdots cor(x_1, x_p) \\ \vdots & \vdots \\ cor(x_2, x_1) & 1 \cdots cor(x_1, x_2) \\ \vdots & \vdots \\ cor(x_n, x_1) & cor(x_n, x_2) \cdots 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

avec :

$$cor(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) = \frac{cov(x_i, x_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (3.30)$$

Puisque les variables sont centrées réduites, la variance de chaque variable vaut 1. Donc l'inertie totale est alors égale à p le nombre de variable.

Rappelons que les matrices des covariances et de corrélations sont toutes deux des matrices carrées et symétriques.

Représenter le nuage de points des données centrées réduites ne modifie rien à la forme de celui-ci. En effet, la différence entre les deux n'est qu'un changement d'échelle.

L'information intéressante pour les individus est la distance entre les points. En effet, plus cette distance sera grande entre deux individus x_i et $x_{i'}$, plus les deux individus seront différents et mieux on pourra les caractériser. Mais, il faut d'abord choisir une distance. Nous prenons une autre distance euclidienne que la distance euclidienne classique, la distance choisie est alors:

$$d^2(e_i, e_{i'}) = \sum_{j=1}^p \frac{1}{\sigma_j^2} (x_{ij} - x_{i'j})^2 \quad (3.31)$$

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.

3.7.3. Particularité de l'ACP normée

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. Cela entraîne que sa trace est toujours égale à p . On a vu que la trace de la matrice est égale à l'inertie totale du nuage calculée avec la distance euclidienne que l'on a choisie.

L'inertie totale du nuage des individus dans R^p est donc toujours égale à p dans toute l'ACP normée. Cette particularité donne une règle supplémentaire pour choisir le nombre d'axes que l'on va garder pour les interprétations, fondée sur le raisonnement suivant : on a p valeurs propres dont la somme vaut p (puisque l'on a vu que l'inertie totale est aussi égale à la somme des valeurs propres), on peut ne considérer comme significatives que les valeurs propres dont la valeur est supérieure à 1 et leur somme vaut p . 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 .

3.8. Interprétation des résultats d'une ACP

Un des points les plus délicats de l'ACP est d'apprécier la perte d'information engendrée par la réduction de la dimension. On a vu précédemment que la qualité de représentation du nuage dans le sous-espace factoriel est exprimée par le pourcentage d'inertie expliquée.

Cette mesure globale doit être complétée par d'autres considérations comme la représentation des individus et des variables dans ce sous-espace factoriel. Il peut en effet

arriver que les axes retenus, bien que représentant une part importante de l'inertie globale du nuage, ne suffisent pas à expliquer correctement certains individus ou variables : deux individus peuvent être proches en projection sur les axes factoriels retenus tout en étant très éloignés en réalité, si leurs représentations sur ces axes 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.

3.8.1. Etude des individus

Il s'agit d'exhiber les relations entre individus du fait de leur proximité. Cela consiste à définir la ressemblance des individus de point de vue de l'ensemble des variables, pour permettre d'identifier des sous-ensembles d'individus afin de constituer une classification c-à-d construire des groupe d'individus ; donc les individus appartenant à un même groupe seront très proche du point de vue des variables, et ils seront très éloignés des individus d'un autre groupe.

3.8.1.1. Représentation des individus dans les nouveaux axes

Pour faire la représentation des individus dans les plans définis par les nouveaux axes (figure 3.9), il suffit de calculer les coordonnées des individus dans les nouveaux axes. Pour obtenir y_{ik} coordonnée de l'individu e_i sur l'axe Δ_k , on projette orthogonalement le vecteur $\overrightarrow{Ge_i}$ sur cet axe.

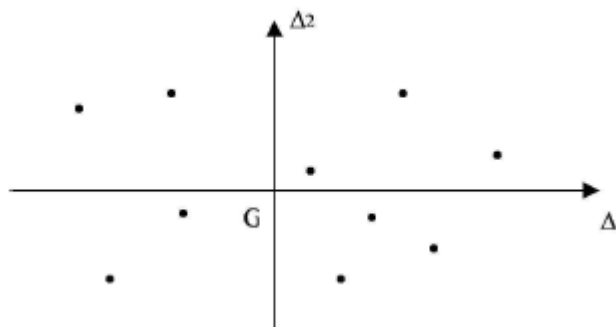


Figure 3.11 : Représentation des individus dans les nouveaux axes (Duby et al, 2008).

❖ Remarque

L'orientation des axes est complètement arbitraire et peut différer d'un logiciel à l'autre. Le signe des coordonnées des individus sur un axe n'a donc pas de signification. En revanche, la comparaison des signes peut s'interpréter. Si deux individus e_i et e'_i ont sur un axe Δ , le premier une coordonnée positive et le second une coordonnée négative, cela signifie qu'ils s'opposent sur cet axe.

3.8.1.2. Qualité de représentation des individus

Les individus contribuant à la formation d'un axe sont ceux dont les coordonnées sur cet axe sont les plus élevées en valeur absolue.

Lorsque des points projections des individus sont éloignés sur un axe (ou sur un plan), on peut assurer que les points représentants ces individus sont éloignés dans l'espace. En revanche, les deux individus dont les projections sont proches sur un axe (ou sur un plan) peuvent ne pas être proches dans l'espace.

Pour interpréter correctement la proximité des projections de deux individus sur un plan, il faut donc s'assurer que ces individus sont bien représentés dans le plan. Pour que l'individu e_i soit bien représenté sur un axe (ou sur un plan, ou un sous-espace), il faut que l'angle entre le vecteur $\overrightarrow{Ge_i}$ et l'axe (ou le plan, ou le sous-espace) soit petit. On calcul donc 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.

$$\cos(\alpha)^2 = \frac{\langle \overrightarrow{Ge_i}, \overrightarrow{Ga_i} \rangle^2}{\|\overrightarrow{Ga_i}\|^2} \quad (3.32)$$

Le cosinus carré est appelé contribution relative du plan à l'individu. Plus un individu est proche du plan plus l'angle est faible 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.

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. On se sert de ces contributions pour interpréter les nouveaux axes de l'ACP en fonction des individus.

3.8.1.3. Interprétation des axes factoriels par les points individus

Les proximités et les oppositions entre individus, par l'analyse de leurs points communs, aident aussi à la compréhension des nouveaux axes. Les individus proches ont des profils semblables. Une analyse typologique peut préciser ces regroupements. Les individus placés au centre du graphique doivent être analysés comme « moyens ». L'analyse est sensible aux individus très différents. Pour ne pas trop falsifier l'analyse, il est possible de les considérer comme des individus supplémentaires.

On peut interpréter le graphe d'individus grâce aux variables ; pour cela on va calculer la corrélation entre la variable et l'axe factoriel. Si la variable est très liée à l'axe factoriel cela voudra dire que les valeurs de la variable sont très liées aux coordonnées de l'axe, donc la corrélation est proche de 1. Si nous avons une corrélation négative, cela voudra dire que les individus qui prennent de faibles valeurs pour la variable prennent de fortes valeurs sur l'axe factoriel.

3.8.2. Etude des variables

Il s'agit d'exhiber les relations entre variables du fait de leurs corrélations, cela consiste à rechercher les ressemblances entre variables ; c-à-d trouver la liaison qui existe entre ces variables. Ces liaisons sont linéaires simple, très fréquente et résument de nombreuses liaisons.

3.8.2.1. Représentation des variables dans les nouveaux axes

Les variables n'ont pas la même signification que les individus, pour bien représenter les variables on peut faire le raisonnement suivant : les individus sont représentés dans l'espace des anciennes variables, en faisant le changement de base de cet espace. Les nouveaux axes sont des combinaisons linéaires des anciens axes et peuvent être considérés comme de nouvelles variables combinaisons linéaires des anciennes.

Ces nouvelles variables sont les « composantes principales »

Il est alors intéressant de voir comment les anciennes variables sont liées aux nouvelles, et pour cela on calcule les corrélations des anciennes variables avec les nouvelles.

a. Corrélation entre les composantes principales et les variables d'origine

Il est souvent utile d'étudier les corrélations entre les variables d'origine x et les nouvelles variables c (les x_i sont toujours supposés centrés pour simplifier les écritures)

Les corrélations entre les axes factoriels et les variables initiales indiquent la qualité de

représentation de la variable sur l'axe. Les coordonnées des variables sont égales aux corrélations avec les axes. Plus une corrélation entre une variable et un axe est forte, plus la variable est proche de l'axe.

Il ne faut interpréter les axes qu'à partir des variables les mieux représentées, c'est-à-dire celles dont la corrélation est proche de 1 en valeur absolue. Autrement dit, les variables bien représentées dans le plan sont proches du cercle des corrélations. La proximité entre points variables n'est exploitable que si ces points sont proches de la circonférence appelée cercle des corrélations.

Ce n'est pas la distance au centre qu'il faut interpréter mais les angles entre les variables et avec les axes. Des variables qui forment un angle nul entre elles sont corrélées, celles qui font un angle droit ne sont pas corrélées, et celles qui présentent un angle plat sont corrélées négativement, car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1. 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 égale à :

$$r_{ij} = \frac{\text{covariance } c_j x_i}{\sqrt{\text{variance } c_j} \sqrt{\text{variance } x_i}} \quad (3.33)$$

Or
$$c = u_j' x \quad (3.34)$$

Corrélation positive $\Rightarrow r_{ij} = 1$

Corrélation négative $\Rightarrow r_{ij} = -1$

Corrélation nulle $\Rightarrow r_{ij} = 0$

- La représentation des anciennes variables se fera en prenant comme coordonnées des anciennes variables leurs coefficients de corrélation avec les nouvelles variables. On obtient alors ce que l'on appelle le « cercle de corrélation », dénomination qui vient du fait qu'un cercle coefficient de corrélation variant entre -1 et +1, les représentations des variables de départ sont des points qui se trouvent à l'intérieur d'un cercle de **rayon 1** (figure 3.10).

Le cercle de corrélation sera complété en reliant son centre aux différents points variables de façon à obtenir les directions de ces variables. En ACP contrairement à une Analyse Factorielle des correspondances, l'interprétation des variables se fait à partir de leurs directions (figure 3.10).

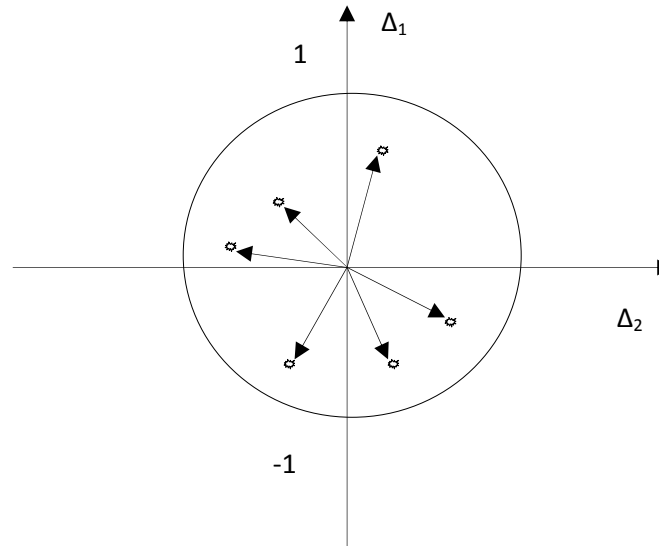


Figure 3.12: Cercle de corrélation (Duby et al, 2008).

3.8.2.2. Etude des liaisons entre les variables

Sur le graphique du cercle des corrélations, on peut aussi interpréter les positions des anciennes variables les unes par rapport aux autres en termes de corrélation. Deux points très proches du cercle des corrélations, donc bien représentées dans le plan, seront très corrélées positivement entre elles ;

Si elles sont proche du cercle, mais dans des positions symétriques par rapport à l'origine, elles seront très corrélées négativement, ceci signifie que l'une augmente quand l'autre diminue.

Deux variables proches du cercle des corrélations et dont les vecteurs qui les joignent à l'origine forment un angle droit, ne seront pas corrélées entre elles.

Il faut, pour interpréter correctement ces graphiques des cercles de corrélation, se souvenir qu'un coefficient de corrélation est une mesure de liaison linéaire entre deux variables, et qu'il peut arriver que deux variables très fortement liées aient un coefficient de corrélation nul ou très faibles, si leur liaison n'est pas linéaire.

3.8.3. Lien entre les deux études

Comme on travail sur un même tableau de données, il existe alors un lien entre les deux études.

Lors de la construction des groupes d'individus, on aura besoin d'utiliser les variables afin de caractériser ces différents groupes. De même, lorsqu'on doit étudier les liaisons entre les différentes variables, avoir des individus spécifique, c-à-d des individus extrême, très particulier peut être un plus pour la déduction de la liaison entre ces variables.

3.9. 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 qu'ils sont des individus supplémentaires.

Il en est de même pour les variables. On peut, par exemple, vouloir représenter une variable qui dépend de façon synthétique des p variables choisies pour faire l'ACP (variable à expliquer), afin de mieux comprendre comment cette variable est liée aux anciennes, mais on ne souhaite pas qu'elle intervienne dans la confection des axes car ses liaisons avec les p variables de départ fausseraient la représentation si elle faisait partie intégrante de l'ACP. Elles sont appelées variables supplémentaires.

Pour représenter un individu supplémentaire, il suffit d'exprimer les coordonnées de cet individu dans la nouvelle base des axes principaux, de ce fait on multiplie l'axe principale par les coordonnées centrées réduites de l'individu supplémentaire. Pour une variable supplémentaire, il suffit de calculer ses coefficients de corrélation empiriques avec les composantes principales.

La plupart des logiciels proposent des options permettant de le faire.

Conclusion

Après avoir exposé le principe de la méthode ACP. Nous allons passer, au prochain chapitre, à son application à un parc de 54 réservoirs dans la wilaya de Tizi-Ouzou.

Pour pouvoir traiter le tableau de données, nous faisons appel au logiciel Stat Box[®]. Ce dernier a été mis à notre disposition par le département d'agronomie dont les étapes sont exposées en annexe 2.

Chapitre 4

Application de l'ACP à un parc de réservoirs

Introduction

Afin d'analyser les 13 différents paramètres (environnementaux, structuraux et fonctionnels) pris en compte par (Hammoum, 2012) pour le calcul de l'indice de vulnérabilité des réservoirs, et déterminer les paramètres les plus influents ; autrement dit rendre l'information moins redondante, nous appliquons dans ce chapitre la méthode dite « ACP » (chapitre 3). Celle-ci consiste à traiter le tableau de données obtenues par la méthode d'expertise, qui est constitué de réservoirs en lignes et des différents paramètres en colonnes tenant compte de la variable "indice de vulnérabilité I_v ". Etant donné la dimension de la matrice (54x14), nous avons fait appel au logiciel Stat Box[®] pour le traitement des données et la conception des graphiques et organigrammes.

4.1. Données brutes pour l'application de l'ACP

Les données sont sous la forme d'un tableau à n lignes et p colonnes, que l'on stocke sous la forme d'une matrice X ($n \times p$). Les réservoirs en nombre de 54 seront en lignes, et les paramètres en nombre de 14 seront en colonnes. L'ACP va procéder au traitement d'un ensemble de variables corrélées en un nombre réduit de facteurs non corrélés.

Afin d'accorder la même importance à chaque variable, nous traitons ce tableau de données par une analyse en composantes principales normée (chapitre 3).

Les données variables-individus sont présentées au tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Données brutes ($n \times p$).

Paramètres Nom du site	code	I_v	Implantation de l'ouvrage	Zone sismique	Type de sol	Action de la neige	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage	Fréquence de l'entretien
Adnis (Irdjen)	1	70.5	3	4	8	4	5.5	9	2	6	6	12	6	1	4
Ait hague (Irdjen)	2	53	3	2	8	4	5	6	2	2	2	8	6	1	4
Ait halli (Irdjen)	3	66.5	3	4	12	4	5.5	9	4	4	2	12	2	1	4
Ait yacoub (Irdjen)	4	53	3	2	4	4	5	6	2	2	6	8	6	1	4
Boudjlil (Irdjen)	5	52	3	2	3	4	6	9	2	4	2	6	6	1	4
Ibhlal (Irdjen)	6	58.5	3	2	8	4	6.5	9	2	8	2	6	3	1	4
Mehriz (Irdjen)	7	51.5	3	4	3	4	5.5	9	2	6	2	2	6	1	4
Mestigua (Irdjen)	8	65.5	3	4	8	4	5.5	6	2	6	4	12	6	1	4
Monobloc1 (Irdjen)	9	52	3	4	12	4	4	9	2	2	2	1	4	1	4
Monobloc2 (Irdjen)	10	52	3	4	6	4	5	9	2	2	2	2	8	1	4
SR1 (Irdjen)	11	60.5	3	4	8	4	6.5	9	2	6	2	6	4	2	4
SR2 (Irdjen)	12	52	3	4	8	4	6	9	2	2	2	2	4	2	4
SR3 (Irdjen)	13	52.5	3	2	8	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1	4
Taghanimt (Irdjen)	14	64.5	3	4	8	4	5.5	9	2	2	8	12	2	1	4
Taksebt (Irdjen)	15	51.5	3	4	4	4	6.5	9	2	4	2	6	1	2	4
Tala amara (Irdjen)	16	48	3	4	4	4	5	9	2	2	2	6	2	1	4
Tansaout (Irdjen)	17	48.5	3	2	4	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1	4
Tamazirt 1 (Irdjen)	18	57	3	4	4	4	5	6	2	2	8	8	6	1	4
Tamazirt 2 (Irdjen)	19	51	3	4	3	4	6	9	2	6	2	2	4	2	4
Zone insutrielle (Irdjen)	20	79	3	2	12	4	6	9	2	4	12	12	6	3	4
Ath Ighil (Irdjen)	21	67	3	4	8	4	6	9	2	6	2	12	6	1	4
Mouldioune village (DBK)	22	75.5	3	4	12	4	6.5	9	4	8	8	9	2	2	4
Mouldioune zone (DBK)	23	545	3	4	8	4	5.5	9	2	2	2	3	4	4	4
Touaresse (DBK)	24	77.5	3	8	12	4	5.5	9	2	6	4	12	2	6	4
Touaresse (DBK)	25	72	3	8	12	4	6	9	4	2	4	8	2	6	4

SR1 (Sidi Naaman)	26	59.5	3	4	12	4	5.5	9	2	4	2	4	2	4	4
SR2 (Sidi Naaman)	27	54.5	3	4	12	4	5.5	9	2	2	2	2	1	4	4
chef lieu (Sidi Naaman)	28	71.5	3	4	12	4	5.5	9	2	8	4	12	2	2	4
Maassal (Sidi Naaman)	29	64	3	4	8	4	6	9	2	4	8	4	4	4	4
Chef lieu 1 (Tadmait)	30	74.5	3	8	12	4	4.5	6	2	6	6	9	4	6	4
Chef lieu 2 (Tadmait)	31	63	3	8	12	4	5	6	2	6	2	3	2	6	4
kef laagab (Tadmait)	32	72	3	4	12	4	5	9	2	6	6	9	6	2	4
Baghdad (Tadmait)	33	60	3	4	12	4	4	6	2	4	4	9	2	2	4
Ait Saada ouarezki (Tadmait)	34	68	3	4	12	4	5	9	2	6	6	9	2	2	4
Ait Saada bas (Tadmait)	35	60	3	2	8	4	6	6	2	4	6	9	4	2	4
Ait Saada haut (Tadmait)	36	50.5	3	2	8	4	5.5	9	4	2	2	1	4	2	4
Tighilt Tiguerfiouine (Tadmait)	37	66	3	4	8	4	5	9	2	6	4	9	4	4	4
Telta 1 (Tadmait)	38	72.5	3	4	12	4	5.5	9	2	6	4	9	8	2	4
Telta 2 (Tadmait)	39	65.5	3	4	12	4	5.5	9	2	4	2	2	8	6	4
Adjaba (Tirmitine)	40	61.5	3	4	4	4	5.5	9	2	4	6	12	2	2	4
Avarane 1 (Tirmitine)	41	75.5	3	4	12	4	5.5	9	2	2	12	12	4	2	4
Avarane 2 (Tirmitine)	42	61	3	4	12	4	5	6	2	6	2	3	4	6	4
Herrouka 1 (Tirmitine)	43	66	3	4	4	4	6	9	2	6	4	12	4	4	4
Herrouka 2 (Tirmitine)	44	56.5	3	4	4	4	5.5	9	2	4	4	8	3	2	4
Ibhlal 1 (Tirmitine)	45	57	3	4	8	4	5	9	2	4	4	4	4	2	4
Ibhlal 2 (Tirmitine)	46	48	3	4	8	4	5	9	2	2	2	1	2	2	4
Megdoul 1 (Tirmitine)	47	56.5	3	4	4	4	5.5	9	2	4	4	1	8	4	4
Megdoul 2 (Tirmitine)	48	49.5	3	4	4	4	5.5	9	2	4	2	3	1	4	4
Menacera (Tirmitine)	49	51.5	3	4	8	4	5.5	9	2	4	2	2	2	2	4
chef lieu 1 (Mekla)	50	69	3	8	12	4	5	6	2	4	2	12	4	3	4
chef lieu 2 (Mekla)	51	63.5	3	6	12	4	4.5	3	2	4	2	12	4	3	4
SRI Chaibe (Mekla)	52	71.5	3	4	12	4	5.5	9	2	6	4	12	4	2	4
SR2 Djamaa N Saridj (Mekla)	53	62	3	4	8	4	5	6	2	4	4	12	4	2	4
SR3 Djamaa N Saridj (Mekla)	54	65.5	3	4	8	4	5.5	9	2	4	6	9	3	4	4

Remarque :

Comme nous l'avons déjà souligné, l'ACP ne sait pas traiter les valeurs identiques d'une variable pour tous les individus. Pour permettre à Stat Box[®] de traiter ce tableau de données, nous avons procédé à l'élimination de toutes ces variables ayant une même valeur ; comme "l'implantation de l'ouvrage", "l'action de la neige" et "la fréquence d'entretien". Ainsi, le nombre de variables est réduit à 11 (tableau 4.2) :

Tableau 4.2 : Tableau traité par Stat Box.

I_v	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
59.5	4	8	5.5	9	2	6	6	12	6	1
42	2	8	5	6	2	2	2	8	6	1
55.5	4	12	5.5	9	4	4	2	12	2	1
42	2	4	5	6	2	2	6	8	6	1
41	2	3	6	9	2	4	2	6	6	1
47.5	2	8	6.5	9	2	8	2	6	3	1
40.5	4	3	5.5	9	2	6	2	2	6	1
54.5	4	8	5.5	6	2	6	4	12	6	1
41	4	12	4	9	2	2	2	1	4	1
41	4	6	5	9	2	2	2	2	8	1
49.5	4	8	6.5	9	2	6	2	6	4	2
41	4	8	6	9	2	2	2	2	4	2
41.5	2	8	5.5	9	2	2	2	4	6	1
53.5	4	8	5.5	9	2	2	8	12	2	1
40.5	4	4	6.5	9	2	4	2	6	1	2
37	4	4	5	9	2	2	2	6	2	1
37.5	2	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1
46	4	4	5	6	2	2	8	8	6	1
40	4	3	6	9	2	6	2	2	4	2
68	2	12	6	9	2	4	12	12	6	3
56	4	8	6	9	2	6	2	12	6	1
64.5	4	12	6.5	9	4	8	8	9	2	2
43.5	4	8	5.5	9	2	2	2	3	4	4
66.5	8	12	5.5	9	2	6	4	12	2	6
61	8	12	6	9	4	2	4	8	2	6
48.5	4	12	5.5	9	2	4	2	4	2	4
43.5	4	12	5.5	9	2	2	2	2	1	4
60.5	4	12	5.5	9	2	8	4	12	2	2
53	4	8	6	9	2	4	8	4	4	4
63.5	8	12	4.5	6	2	6	6	9	4	6
52	8	12	5	6	2	6	2	3	2	6
61	4	12	5	9	2	6	6	9	6	2
49	4	12	4	6	2	4	4	9	2	2
57	4	12	5	9	2	6	6	9	2	2
49	2	8	6	6	2	4	6	9	4	2
39.5	2	8	5.5	9	4	2	2	1	4	2
55	4	8	5	9	2	6	4	9	4	4

61.5	4	12	5.5	9	2	6	4	9	8	2
54.5	4	12	5.5	9	2	4	2	2	8	6
50.5	4	4	5.5	9	2	4	6	12	2	2
64.5	4	12	5.5	9	2	2	12	12	4	2
50	4	12	5	6	2	6	2	3	4	6
55	4	4	6	9	2	6	4	12	4	4
45.5	4	4	5.5	9	2	4	4	8	3	2
46	4	8	5	9	2	4	4	4	4	2
37	4	8	5	9	2	2	2	1	2	2
45.5	4	4	5.5	9	2	4	4	1	8	4
38.5	4	4	5.5	9	2	4	2	3	1	4
40.5	4	8	5.5	9	2	4	2	2	2	2
58	8	12	5	6	2	4	2	12	4	3
52.5	6	12	4.5	3	2	4	2	12	4	3
60.5	4	12	5.5	9	2	6	4	12	4	2
51	4	8	5	6	2	4	4	12	4	2
54.5	4	8	5.5	9	2	4	6	9	3	4

4.2. L'ACP est elle applicable ?

Dans la théorie, comme dans la pratique, l'ACP se met en œuvre sur la matrice de variance-covariance ou sur la matrice des corrélations (chapitre 3). Le logiciel Stat Box[®] 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.

Nous verrons dans les sections qui suivront, les différentes étapes de l'étude de cette matrice de corrélations.

Il est bon de souligner, qu'il existe des cas où l'ACP est totalement injustifiée. 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 au préalable certains critères.

4.2.1. Les données sont-elles factorisables ?

On parle de la factorisation des variables lorsqu'il existe un lien entre elles. Ce lien, traduit par la présence de corrélations, permet d'extraire les composantes principales. En effet, on peut considérer l'ACP comme une compression de l'information ainsi, l'idée sous-jacente à ces indicateurs (variables) est la suivante : est-ce qu'il est possible d'obtenir un bon résumé de l'information ? Ceci n'est possible que si les données présentent une certaine redondance. Si les variables sont parfaitement corrélées, un seul axe factoriel suffit, il restituera 100% de l'information disponible. A l'inverse, si elles sont deux à deux orthogonales, a fortiori si elles sont deux à deux indépendantes, le nombre adéquat de facteurs

à retenir est égal au nombre de variables. Dans ce dernier cas, la matrice de corrélation (impliquée dans le calcul de la solution) est la matrice unité (ou matrice identité).

Une première stratégie consiste simplement à inspecter la matrice de corrélation. Les éléments hors diagonale prennent des valeurs faibles (en valeur 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 des liaisons exploitables 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

4.2.1.1. Test de sphéricité de Bartlett

Il est recommandé de vérifier le test de sphéricité de Bartlett avant d'entamer le calcul de l'ACP. Ce test propose une mesure globale en s'appuyant sur une démarche statistique. Il vise à détecter dans quelle mesure la matrice de corrélation calculée à partir de nos données (matrice observée) diverge significativement de la matrice unité. Il vérifie l'hypothèse nulle selon laquelle toutes les corrélations seraient égales à zéro. On doit donc tenter de rejeter l'hypothèse nulle c-à-d que le test doit être significatif. 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). Ce test est très sensible au nombre de cas et il est presque toujours significatif lorsque le nombre de cas est grand, donc ces résultats sont intéressants presque uniquement lorsqu'il y a moins de 5 cas par variable. En ce sens, le rejet de l'hypothèse nulle ne garantit pas nécessairement que l'ACP donne de bons résultats. A l'inverse, si le test de Bartlett ne nous permet pas de rejeter l'hypothèse nulle, nous sommes en présence d'une situation vraiment extrême où l'ACP n'est pas justifiée.

Évidemment, nous souhaitons vivement que ce test soit significatif pour nous autoriser à rejeter l'hypothèse nulle d'identité indiquant l'absence de corrélation significative entre nos variables.

Pour répondre à toutes ces questions, dans un premier temps, il convient d'observer la matrice des corrélations obtenu par Stat Box[®] (tableau 4.3). Si plusieurs variables sont

corrélées, la factorisation est possible. Si non, la factorisation n'a pas de sens et n'est donc pas conseillée.

Tableau 4.3 : Matrice de corrélation.

	Iv	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
Iv	1	0.42	0.65	0.08	-0.05	0.16	0.52	0.59	0.72	0.01	0.34
Zone sismique	0.42	1	0.40	-0.25	-0.24	0.08	0.19	-0.06	0.17	-0.30	0.61
Type de sol	0.65	0.40	1	-0.26	-0.17	0.22	0.21	0.16	0.25	-0.18	0.38
Action de vent	0.08	-0.25	-0.26	1	0.48	0.23	0.26	0.08	0.02	-0.05	-0.05
Type de la structure	-0.05	-0.24	-0.17	0.48	1	0.15	0.02	0.01	-0.25	-0.08	-0.10
Type des fondations	0.16	0.08	0.22	0.23	0.15	1	-0.04	0.01	0.03	-0.22	0.04
Etanchéité de la paroi	0.52	0.19	0.21	0.26	0.02	-0.04	1	0.04	0.33	-0.05	0.15
Etanchéité de la couverture	0.59	-0.06	0.16	0.08	0.01	0.01	0.04	1	0.50	0.05	-0.01
Défauts apparents	0.72	0.17	0.25	0.02	-0.25	0.03	0.33	0.50	1	-0.07	-0.12
Rôle de réservoir	0.01	-0.30	-0.18	-0.05	-0.08	-0.22	-0.05	0.05	-0.07	1	-0.20
Importance de l'ouvrage	0.34	0.61	0.38	-0.05	-0.10	0.04	0.15	-0.01	-0.12	-0.20	1

Le test de sphéricité de Bartlett α (le risque d'erreur) est calculé et affiché par le logiciel Stat Box[®]. Cependant, pour le tableau de données que nous avons traité, il n'a pas été affiché. Ceci ne nous permet donc pas d'établir une quelconque conclusion sur ces résultats. La raison est due vraisemblablement au fait que nous avons pris en considération la variable I_v (indice de vulnérabilité) qui est une combinaison linéaire avec les autres variables (chapitre 2).

4.2.1.2. La matrice des corrélations est elle singulière?

Toujours par rapport à la matrice des corrélations, il peut arriver que nous soyons dans un cas de corrélation parfaite : on parle de singularité de la matrice des corrélations, c'est-à-dire que l'une des variables est parfaitement corrélée avec une autre variable ou avec une combinaison linéaire de variables. Pour tester la corrélation parfaite, il faut calculer le déterminant de la matrice. Par définition, **une matrice singulière** est de déterminant nul (0) (elle n'est donc pas inversible).

Imaginez, par exemple que dans notre base de données, nous ayons la variable « moyenne » représentant la moyenne des différentes variables. Cette variable serait obtenue en faisant la moyenne arithmétique, pondérée par les coefficients. La variable « moyenne » serait donc parfaitement corrélée avec l'ensemble des variables, puisqu'étant une combinaison linéaire de ces dernières. 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 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. 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)**.

Qu'en est-il de notre matrice des corrélations ?

Grace au logiciel Excel[®], on a pu calculer le déterminant de la matrice de corrélation qui est égale à -2.12×10^{-17} . Le déterminant est inférieur à 0, cela signifie que notre matrice est singulière. La raison est que la variable I_v (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.

Afin de poursuivre notre ACP, nous devons supprimer cette colonne I_v . Ainsi nos nouvelles variables seront réduites à 10 (tableau 4.4) :

Tableau 4.4 : Nouveau tableau de données ACP.

Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
4	8	5.5	9	2	6	6	12	6	1
2	8	5	6	2	2	2	8	6	1
4	12	5.5	9	4	4	2	12	2	1
2	4	5	6	2	2	6	8	6	1
2	3	6	9	2	4	2	6	6	1
2	8	6.5	9	2	8	2	6	3	1
4	3	5.5	9	2	6	2	2	6	1
4	8	5.5	6	2	6	4	12	6	1
4	12	4	9	2	2	2	1	4	1
4	6	5	9	2	2	2	2	8	1
4	8	6.5	9	2	6	2	6	4	2
4	8	6	9	2	2	2	2	4	2
2	8	5.5	9	2	2	2	4	6	1
4	8	5.5	9	2	2	8	12	2	1
4	4	6.5	9	2	4	2	6	1	2
4	4	5	9	2	2	2	6	2	1
2	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1
4	4	5	6	2	2	8	8	6	1
4	3	6	9	2	6	2	2	4	2
2	12	6	9	2	4	12	12	6	3
4	8	6	9	2	6	2	12	6	1
4	12	6.5	9	4	8	8	9	2	2
4	8	5.5	9	2	2	2	3	4	4
8	12	5.5	9	2	6	4	12	2	6
8	12	6	9	4	2	4	8	2	6
4	12	5.5	9	2	4	2	4	2	4
4	12	5.5	9	2	2	2	2	1	4

4	12	5.5	9	2	8	4	12	2	2
4	8	6	9	2	4	8	4	4	4
8	12	4.5	6	2	6	6	9	4	6
8	12	5	6	2	6	2	3	2	6
4	12	5	9	2	6	6	9	6	2
4	12	4	6	2	4	4	9	2	2
4	12	5	9	2	6	6	9	2	2
2	8	6	6	2	4	6	9	4	2
2	8	5.5	9	4	2	2	1	4	2
4	8	5	9	2	6	4	9	4	4
4	12	5.5	9	2	6	4	9	8	2
4	12	5.5	9	2	4	2	2	8	6
4	4	5.5	9	2	4	6	12	2	2
4	12	5.5	9	2	2	12	12	4	2
4	12	5	6	2	6	2	3	4	6
4	4	6	9	2	6	4	12	4	4
4	4	5.5	9	2	4	4	8	3	2
4	8	5	9	2	4	4	4	4	2
4	8	5	9	2	2	2	1	2	2
4	4	5.5	9	2	4	4	1	8	4
4	4	5.5	9	2	4	2	3	1	4
4	8	5.5	9	2	4	2	2	2	2
8	12	5	6	2	4	2	12	4	3
6	12	4.5	3	2	4	2	12	4	3
4	12	5.5	9	2	6	4	12	4	2
4	8	5	6	2	4	4	12	4	2
4	8	5.5	9	2	4	6	9	3	4

Par la suite, visualisons la nouvelle matrice de corrélation (tableau 4.5), données par Stat Box[®]:

Tableau 4.5 : Matrice de corrélation.

	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
Zone sismique	1	0.40	-0.25	-0.24	0.08	0.19	-0.06	0.17	-0.30	0.61
Type de sol	0.40	1	-0.26	-0.17	0.22	0.21	0.16	0.25	-0.18	0.38
Action de vent	-0.25	-0.26	1	0.48	0.23	0.26	0.08	0.02	-0.05	-0.05
Type de la structure	-0.24	-0.17	0.48	1	0.15	0.02	0.01	-0.25	-0.08	-0.10
Type des fondations	0.08	0.22	0.23	0.15	1	-0.04	0.01	0.03	-0.22	0.04
Etanchéité de la paroi	0.19	0.21	0.26	0.02	-0.04	1	0.04	0.33	-0.05	0.15
Etanchéité de la couverture	-0.06	0.16	0.08	0.01	0.01	0.04	1	0.50	0.05	-0.01
Défauts apparents	0.17	0.25	0.02	-0.25	0.03	0.33	0.50	1	-0.07	-0.12
Rôle de réservoir	-0.30	-0.18	-0.05	-0.08	-0.22	-0.05	0.05	-0.07	1	-0.20
Importance de l'ouvrage	0.61	0.38	-0.05	-0.10	0.04	0.15	-0.01	-0.12	-0.20	1

Le test de sphéricité de Bartlett :

- l'indice de signification α (risque d'erreur) donné par Stat Box[®] est égal à 0.05 (5%). Nous pouvons donc rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation significative entre les variables. Autrement dit, la corrélation entre les variables est significative ; ce qui veut dire que notre ACP est acceptable.
- Le déterminant de cette nouvelle matrice est égale à : 0.08. Il est différent de 1 et est supérieur à 10^{-5} . Nous concluons que notre matrice n'est pas singulière.

Ainsi, nous venons de voir deux indices (le déterminant et le test de sphéricité de Bartlett) lesquels nous ont aidé 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 l'ensemble des autres variables. En inspectant, une par une, pour chaque rangée de la matrice de corrélation (tableau 4.5), nous constatons que les variables démontrent généralement au moins une corrélation substantielle avec une autre à l'exception du "type de fondation".

Lorsque nous sommes en présence de ce type de variables qui n'est en corrélation avec aucune autre dans la matrice, il est recommandé de la retrancher et de reprendre le calcul de l'ACP, car toutes les variables doivent faire partie de la solution, c'est-à-dire être corrélées minimalement avec une variable. Sinon, elles constituent des cas aberrants et doivent par conséquent être retirées de l'analyse. Cela va diminuer la perte d'information et donc maximiser la variance expliquée par les q axes choisis.

Pour relancer encore une fois Stat Box[®], nous retiendrons 9 variables (tableau 4.6) :

Tableau 4.6 : Tableau de données finales.

Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
4	8	5.5	9	6	6	12	6	1
2	8	5	6	2	2	8	6	1
4	12	5.5	9	4	2	12	2	1
2	4	5	6	2	6	8	6	1
2	3	6	9	4	2	6	6	1
2	8	6.5	9	8	2	6	3	1
4	3	5.5	9	6	2	2	6	1
4	8	5.5	6	6	4	12	6	1
4	12	4	9	2	2	1	4	1
4	6	5	9	2	2	2	8	1

4	8	6.5	9	6	2	6	4	2
4	8	6	9	2	2	2	4	2
2	8	5.5	9	2	2	4	6	1
4	8	5.5	9	2	8	12	2	1
4	4	6.5	9	4	2	6	1	2
4	4	5	9	2	2	6	2	1
2	4	5.5	9	2	2	4	6	1
4	4	5	6	2	8	8	6	1
4	3	6	9	6	2	2	4	2
2	12	6	9	4	12	12	6	3
4	8	6	9	6	2	12	6	1
4	12	6.5	9	8	8	9	2	2
4	8	5.5	9	2	2	3	4	4
8	12	5.5	9	6	4	12	2	6
8	12	6	9	2	4	8	2	6
4	12	5.5	9	4	2	4	2	4
4	12	5.5	9	2	2	2	1	4
4	12	5.5	9	8	4	12	2	2
4	8	6	9	4	8	4	4	4
8	12	4.5	6	6	6	9	4	6
8	12	5	6	6	2	3	2	6
4	12	5	9	6	6	9	6	2
4	12	4	6	4	4	9	2	2
4	12	5	9	6	6	9	2	2
2	8	6	6	4	6	9	4	2
2	8	5.5	9	2	2	1	4	2
4	8	5	9	6	4	9	4	4
4	12	5.5	9	6	4	9	8	2
4	12	5.5	9	4	2	2	8	6
4	4	5.5	9	4	6	12	2	2
4	12	5.5	9	2	12	12	4	2
4	12	5	6	6	2	3	4	6
4	4	6	9	6	4	12	4	4
4	4	5.5	9	4	4	8	3	2
4	8	5	9	4	4	4	4	2
4	8	5	9	2	2	1	2	2
4	4	5.5	9	4	4	1	8	4
4	4	5.5	9	4	2	3	1	4
4	8	5.5	9	4	2	2	2	2
8	12	5	6	4	2	12	4	3
6	12	4.5	3	4	2	12	4	3
4	12	5.5	9	6	4	12	4	2
4	8	5	6	4	4	12	4	2
4	8	5.5	9	4	6	9	3	4

La nouvelle matrice de corrélation est donnée par Stat Box[®] comme suit (tableau4.7) :

Tableau 4.7 : Matrice de corrélation finale.

	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
Zone sismique	1	0.40	-0.25	-0.24	0.19	-0.06	0.17	-0.30	0.61
Type de sol	0.40	1	-0.26	-0.17	0.21	0.16	0.25	-0.18	0.38
Action de vent	-0.25	-0.26	1	0.48	0.26	0.08	0.02	-0.05	-0.05
Type de la structure	-0.24	-0.17	0.48	1	0.02	0.01	-0.25	-0.08	-0.10
Etanchéité de la paroi	0.19	0.21	0.26	0.02	1	0.04	0.33	-0.05	0.15
Etanchéité de la couverture	-0.06	0.16	0.08	0.01	0.04	1	0.50	0.05	-0.01
Défauts apparents	0.17	0.25	0.02	-0.25	0.33	0.50	1	-0.07	-0.12
Rôle de réservoir	-0.30	-0.18	-0.05	-0.08	-0.05	0.05	-0.07	1	-0.20
Importance de l'ouvrage	0.61	0.38	-0.05	-0.10	0.15	-0.01	-0.12	-0.20	1

Le test de sphéricité de Bartlett α est égal à 0.05. Ainsi, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle d'absence de corrélation significative entre les variables. Autrement dit, la corrélation entre les variables est significative, cela veut dire que notre ACP est bien acceptable.

Le déterminant de cette nouvelle matrice est égal à 0.10. Il est différent de 1 et est supérieur à 10^{-5} . Nous concluons que notre matrice n'est pas singulière.

Maintenant que nous avons notre matrice de corrélation finale, il ya lieu de connaître le seuil de corrélation significative.

➤ **coefficient de corrélation de Bravais-Pearson « r »**

Le coefficient de corrélation « r » 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 y à l'aide d'un modèle linéaire.

Il permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux caractères quantitatifs. C'est donc un paramètre important dans l'analyse de l'ACP. En revanche, ce coefficient est nul ($r = 0$) lorsqu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables (ce qui n'exclut pas l'existence d'une relation autre que linéaire). Par ailleurs, le coefficient est de signe positif si la relation est positive (directe, croissante) et de signe négatif si la relation est négative (inverse, décroissante).

Le coefficient « r » de Bravais-Pearson entre deux variables x et y se calcul à partir de la covariance et des écart-types conformément à la formule (3.7).

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. Quand ce nombre augmente, le seuil inférieur de signification diminue. La table de **Bravais-Pearson** (tableau 4.8) fournit les valeurs r critiques au-delà desquelles les coefficients de corrélation de Pearson 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 $ddl=n-2$, 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 ci-dessous (tableau 4.8) la table de Bravais-Pearson aux niveaux de signification $\alpha = 0,1$ (10%), 0.05 (5%), 0.02 (2%), 0.01 (1%), 0.001 (0.1%).

Tableau 4.8 : Table de Bravais-Pearson (Dagnelie, 2011).

α ddl	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 54. Donc le ddl vaut 52. Du tableau 4.8, nous obtenons par interpolation $r_{\text{critique}} = 0.268$. Cela signifie qu'au delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Stat Box traite ce calcul automatiquement, toutes les corrélations qui sont apparues en gras, dans la matrice de corrélation (tableau 4.7), sont significatives.

4.3. Vérification des étapes de l'ACP

4.3.1. Moyennes et écarts types des variables

La moyenne empirique du tableau 4.6 est son centre de gravité. Pour trouver le Barycentre, cela revient à centrer le tableau de données (tableau 4.6), c-à-d trouver le vecteur G de dimension p qui a pour élément les moyennes par variable (chapitre 3).

La moyenne et l'écart type des variables sont déterminés à partir du logiciel Stat Box[®] conformément aux relations (3.4) et (3.5) respectivement. Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.9 ci-dessous :

Tableau 4.9 : Moyenne et écarts types des variables.

	Moyennes	Ecart-types
Zone sismique	4.07	1.49
Type de sol	8.50	3.22
Action de vent	5.44	0.54
Type de la structure	8.28	1.41
Etanchéité de la paroi	4.22	1.79
Etanchéité de la couverture	3.89	2.48
Défauts apparents	7.06	3.96
Rôle de réservoir	4.00	1.91
Importance de l'ouvrage	2.54	1.58

4.3.2. Centrage du tableau de données (matrice centrée)

Centrer les données ne modifie pas la forme du nuage de points de données dans l'espace, cela revient juste à translater le nuage vers une autre origine qui est le centre de gravité du nuage (chapitre 3).

La matrice centrée est déterminée à partir du calcul conformément à la relation (3.10). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.10 ci-dessous. Les nouvelles valeurs représentent les nouvelles coordonnées des points variables par rapport au barycentre.

Tableau 4.10 : Matrice des données centrées.

	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
1	-0.07	-0.50	0.06	0.72	1.78	2.11	4.94	2.00	-1.54
2	-2.07	-0.50	-0.44	-2.28	-2.22	-1.89	0.94	2.00	-1.54
3	-0.07	3.50	0.06	0.72	-0.22	-1.89	4.94	-2.00	-1.54
4	-2.07	-4.50	-0.44	-2.28	-2.22	2.11	0.94	2.00	-1.54
5	-2.07	-5.50	0.56	0.72	-0.22	-1.89	-1.06	2.00	-1.54
6	-2.07	-0.50	1.06	0.72	3.78	-1.89	-1.06	-1.00	-1.54
7	-0.07	-5.50	0.06	0.72	1.78	-1.89	-5.06	2.00	-1.54
8	-0.07	-0.50	0.06	-2.28	1.78	0.11	4.94	2.00	-1.54
9	-0.07	3.50	-1.44	0.72	-2.22	-1.89	-6.06	0.00	-1.54
10	-0.07	-2.50	-0.44	0.72	-2.22	-1.89	-5.06	4.00	-1.54
11	-0.07	-0.50	1.06	0.72	1.78	-1.89	-1.06	0.00	-0.54
12	-0.07	-0.50	0.56	0.72	-2.22	-1.89	-5.06	0.00	-0.54
13	-2.07	-0.50	0.06	0.72	-2.22	-1.89	-3.06	2.00	-1.54
14	-0.07	-0.50	0.06	0.72	-2.22	4.11	4.94	-2.00	-1.54
15	-0.07	-4.50	1.06	0.72	-0.22	-1.89	-1.06	-3.00	-0.54
16	-0.07	-4.50	-0.44	0.72	-2.22	-1.89	-1.06	-2.00	-1.54
17	-2.07	-4.50	0.06	0.72	-2.22	-1.89	-3.06	2.00	-1.54
18	-0.07	-4.50	-0.44	-2.28	-2.22	4.11	0.94	2.00	-1.54
19	-0.07	-5.50	0.56	0.72	1.78	-1.89	-5.06	0.00	-0.54
20	-2.07	3.50	0.56	0.72	-0.22	8.11	4.94	2.00	0.46

21	-0.07	-0.50	0.56	0.72	1.78	-1.89	4.94	2.00	-1.54
22	-0.07	3.50	1.06	0.72	3.78	4.11	1.94	-2.00	-0.54
23	-0.07	-0.50	0.06	0.72	-2.22	-1.89	-4.06	0.00	1.46
24	3.93	3.50	0.06	0.72	1.78	0.11	4.94	-2.00	3.46
25	3.93	3.50	0.56	0.72	-2.22	0.11	0.94	-2.00	3.46
26	-0.07	3.50	0.06	0.72	-0.22	-1.89	-3.06	-2.00	1.46
27	-0.07	3.50	0.06	0.72	-2.22	-1.89	-5.06	-3.00	1.46
28	-0.07	3.50	0.06	0.72	3.78	0.11	4.94	-2.00	-0.54
29	-0.07	-0.50	0.56	0.72	-0.22	4.11	-3.06	0.00	1.46
30	3.93	3.50	-0.94	-2.28	1.78	2.11	1.94	0.00	3.46
31	3.93	3.50	-0.44	-2.28	1.78	-1.89	-4.06	-2.00	3.46
32	-0.07	3.50	-0.44	0.72	1.78	2.11	1.94	2.00	-0.54
33	-0.07	3.50	-1.44	-2.28	-0.22	0.11	1.94	-2.00	-0.54
34	-0.07	3.50	-0.44	0.72	1.78	2.11	1.94	-2.00	-0.54
35	-2.07	-0.50	0.56	-2.28	-0.22	2.11	1.94	0.00	-0.54
36	-2.07	-0.50	0.06	0.72	-2.22	-1.89	-6.06	0.00	-0.54
37	-0.07	-0.50	-0.44	0.72	1.78	0.11	1.94	0.00	1.46
38	-0.07	3.50	0.06	0.72	1.78	0.11	1.94	4.00	-0.54
39	-0.07	3.50	0.06	0.72	-0.22	-1.89	-5.06	4.00	3.46
40	-0.07	-4.50	0.06	0.72	-0.22	2.11	4.94	-2.00	-0.54
41	-0.07	3.50	0.06	0.72	-2.22	8.11	4.94	0.00	-0.54
42	-0.07	3.50	-0.44	-2.28	1.78	-1.89	-4.06	0.00	3.46
43	-0.07	-4.50	0.56	0.72	1.78	0.11	4.94	0.00	1.46
44	-0.07	-4.50	0.06	0.72	-0.22	0.11	0.94	-1.00	-0.54
45	-0.07	-0.50	-0.44	0.72	-0.22	0.11	-3.06	0.00	-0.54
46	-0.07	-0.50	-0.44	0.72	-2.22	-1.89	-6.06	-2.00	-0.54
47	-0.07	-4.50	0.06	0.72	-0.22	0.11	-6.06	4.00	1.46
48	-0.07	-4.50	0.06	0.72	-0.22	-1.89	-4.06	-3.00	1.46
49	-0.07	-0.50	0.06	0.72	-0.22	-1.89	-5.06	-2.00	-0.54
50	3.93	3.50	-0.44	-2.28	-0.22	-1.89	4.94	0.00	0.46
51	1.93	3.50	-0.94	-5.28	-0.22	-1.89	4.94	0.00	0.46
52	-0.07	3.50	0.06	0.72	1.78	0.11	4.94	0.00	-0.54
53	-0.07	-0.50	-0.44	-2.28	-0.22	0.11	4.94	0.00	-0.54
54	-0.07	-0.50	0.06	0.72	-0.22	2.11	1.94	-1.00	1.46

4.3.3. Réduction du tableau de données centrées (matrice centrée 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 à partir du calcul conformément à la relation (3.23). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.11 ci-dessous. Les nouvelles valeurs représentent les valeurs centrées avec la même importance.

Tableau 4.11 : Matrice des données centrées réduites.

	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage
1	-0.05	-0.16	0.12	0.51	0.99	0.85	1.25	1.04	-0.97
2	-1.39	-0.16	-0.80	-1.62	-1.24	-0.76	0.24	1.04	-0.97
3	-0.05	1.09	0.12	0.51	-0.12	-0.76	1.25	-1.04	-0.97
4	-1.39	-1.40	-0.80	-1.62	-1.24	0.85	0.24	1.04	-0.97
5	-1.39	-1.71	1.04	0.51	-0.12	-0.76	-0.27	1.04	-0.97
6	-1.39	-0.16	1.95	0.51	2.11	-0.76	-0.27	-0.52	-0.97
7	-0.05	-1.71	0.12	0.51	0.99	-0.76	-1.28	1.04	-0.97
8	-0.05	-0.16	0.12	-1.62	0.99	0.04	1.25	1.04	-0.97
9	-0.05	1.09	-2.63	0.51	-1.24	-0.76	-1.53	0.00	-0.97
10	-0.05	-0.78	-0.80	0.51	-1.24	-0.76	-1.28	2.09	-0.97
11	-0.05	-0.16	1.95	0.51	0.99	-0.76	-0.27	0.00	-0.34
12	-0.05	-0.16	1.04	0.51	-1.24	-0.76	-1.28	0.00	-0.34
13	-1.39	-0.16	0.12	0.51	-1.24	-0.76	-0.77	1.04	-0.97
14	-0.05	-0.16	0.12	0.51	-1.24	1.66	1.25	-1.04	-0.97
15	-0.05	-1.40	1.95	0.51	-0.12	-0.76	-0.27	-1.57	-0.34
16	-0.05	-1.40	-0.80	0.51	-1.24	-0.76	-0.27	-1.04	-0.97
17	-1.39	-1.40	0.12	0.51	-1.24	-0.76	-0.77	1.04	-0.97
18	-0.05	-1.40	-0.80	-1.62	-1.24	1.66	0.24	1.04	-0.97
19	-0.05	-1.71	1.04	0.51	0.99	-0.76	-1.28	0.00	-0.34
20	-1.39	1.09	1.04	0.51	-0.12	3.27	1.25	1.04	0.29
21	-0.05	-0.16	1.04	0.51	0.99	-0.76	1.25	1.04	-0.97
22	-0.05	1.09	1.95	0.51	2.11	1.66	0.49	-1.04	-0.34
23	-0.05	-0.16	0.12	0.51	-1.24	-0.76	-1.02	0.00	0.92
24	2.64	1.09	0.12	0.51	0.99	0.04	1.25	-1.04	2.19
25	2.64	1.09	1.04	0.51	-1.24	0.04	0.24	-1.04	2.19
26	-0.05	1.09	0.12	0.51	-0.12	-0.76	-0.77	-1.04	0.92
27	-0.05	1.09	0.12	0.51	-1.24	-0.76	-1.28	-1.57	0.92
28	-0.05	1.09	0.12	0.51	2.11	0.04	1.25	-1.04	-0.34
29	-0.05	-0.16	1.04	0.51	-0.12	1.66	-0.77	0.00	0.92
30	2.64	1.09	-1.72	-1.62	0.99	0.85	0.49	0.00	2.19
31	2.64	1.09	-0.80	-1.62	0.99	-0.76	-1.02	-1.04	2.19
32	-0.05	1.09	-0.80	0.51	0.99	0.85	0.49	1.04	-0.34
33	-0.05	1.09	-2.63	-1.62	-0.12	0.04	0.49	-1.04	-0.34
34	-0.05	1.09	-0.80	0.51	0.99	0.85	0.49	-1.04	-0.34
35	-1.39	-0.16	1.04	-1.62	-0.12	0.85	0.49	0.00	-0.34
36	-1.39	-0.16	0.12	0.51	-1.24	-0.76	-1.53	0.00	-0.34
37	-0.05	-0.16	-0.80	0.51	0.99	0.04	0.49	0.00	0.92
38	-0.05	1.09	0.12	0.51	0.99	0.04	0.49	2.09	-0.34
39	-0.05	1.09	0.12	0.51	-0.12	-0.76	-1.28	2.09	2.19
40	-0.05	-1.40	0.12	0.51	-0.12	0.85	1.25	-1.04	-0.34
41	-0.05	1.09	0.12	0.51	-1.24	3.27	1.25	0.00	-0.34
42	-0.05	1.09	-0.80	-1.62	0.99	-0.76	-1.02	0.00	2.19
43	-0.05	-1.40	1.04	0.51	0.99	0.04	1.25	0.00	0.92

44	-0.05	-1.40	0.12	0.51	-0.12	0.04	0.24	-0.52	-0.34
45	-0.05	-0.16	-0.80	0.51	-0.12	0.04	-0.77	0.00	-0.34
46	-0.05	-0.16	-0.80	0.51	-1.24	-0.76	-1.53	-1.04	-0.34
47	-0.05	-1.40	0.12	0.51	-0.12	0.04	-1.53	2.09	0.92
48	-0.05	-1.40	0.12	0.51	-0.12	-0.76	-1.02	-1.57	0.92
49	-0.05	-0.16	0.12	0.51	-0.12	-0.76	-1.28	-1.04	-0.34
50	2.64	1.09	-0.80	-1.62	-0.12	-0.76	1.25	0.00	0.29
51	1.29	1.09	-1.72	-3.75	-0.12	-0.76	1.25	0.00	0.29
52	-0.05	1.09	0.12	0.51	0.99	0.04	1.25	0.00	-0.34
53	-0.05	-0.16	-0.80	-1.62	-0.12	0.04	1.25	0.00	-0.34
54	-0.05	-0.16	0.12	0.51	-0.12	0.85	0.49	-0.52	0.92
Σ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Les données sont centrées et réduites, c'est-à-dire que chaque variable a une moyenne nulle et une variance égale à 1.

4.3.4. Matrice des corrélations

La matrice des corrélations est déterminée à partir du logiciel Stat Box[®] conformément à la relation (3.26). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.7.

On peut déduire les corrélations significatives grâce à la table de Bravais-Pearson, mais il existe des niveaux de signification.

Comme notre seuil minimal de risque d'erreur $\alpha = 0.05$ (seuil critique), donc :

- 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 (***)**.

Voyons notre matrice de corrélation :

Nous avons :

- une corrélation significative (*) négative entre :
"zone sismique" et "rôle de réservoir" (**$r = -0.30$**) ;
- une corrélation significative positive entre :
"étanchéité de la paroi" et "défauts apparents" (**$r = 0.33$**);
- des corrélations hautement significatives (**) positives entre :
"importance de l'ouvrage" et "type de sol" (**$r = 0.38$**) ;
"zone sismique et type de sol" (**$r = 0.40$**) ;
- des corrélations très hautement significatives (***) positives entre :
"action du vent" et "type de structure" (**$r = 0.48$**) ;

"étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" ($r = 0.50$) ;

"zone sismique" et "importance de l'ouvrage" ($r = 0.61$).

Les variables corrélées 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.

4.3.5. Choix du nombre d'axe à retenir

Deux critères empiriques sont à vérifier pour sélectionner le nombre d'axes :

- **critère du coude de Cattell** : le Graphique des valeurs propres (figure 4.1) donne une représentation graphique des informations sur les valeurs propres de chaque facteur présentées dans le tableau 4.12. Dans cette représentation, il faut rechercher le point (un décrochement ou coude) de cassure qui représente le nombre de facteurs au-delà duquel l'information ajoutée est peu pertinente. Nous sélectionnons les axes avant le décrochement. Plus la courbe est accentuée, plus il apparaît qu'un petit nombre de facteurs explique la majeure partie de la variance. A partir du moment où la courbe devient presque une ligne droite horizontale, il apparaît que les facteurs subséquents apportent peu de nouvelles informations.
- **Critère de Kaiser** : comme nous sommes en ACP normée, on ne retiendra que les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1.

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

4.3.5.1. Vecteurs propres

Les vecteurs propres sont les axes principaux d'inertie maximum associés aux valeurs propres. Ils sont donnés par le logiciel Stat Box conformément à la relation (3.18). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.12 ci-dessous :

Tableau 4.12 : Vecteurs propres.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Zone sismique	0.52	-0.15	0.17	0.03	-0.01	-0.31	0.57	0.20	-0.47
Type de sol	0.47	0.05	-0.01	-0.10	0.23	0.73	-0.25	0.33	-0.14
Action de vent	-0.24	0.41	0.48	0.09	0.05	-0.28	-0.35	0.51	-0.25
Type de la structure	-0.29	0.18	0.51	-0.26	0.26	0.33	0.57	-0.06	0.22
Etanchéité de la paroi	0.22	0.40	0.25	0.64	-0.19	0.18	0.00	-0.49	-0.08
Etanchéité de la couverture	0.11	0.52	-0.26	-0.42	0.42	-0.20	-0.07	-0.40	-0.30
Défauts apparents	0.27	0.55	-0.30	-0.03	-0.26	-0.11	0.24	0.35	0.53
Rôle de réservoir	-0.23	0.01	-0.37	0.57	0.63	0.00	0.22	0.22	-0.01
Importance de l'ouvrage	0.42	-0.19	0.35	0.04	0.45	-0.32	-0.24	-0.12	0.53

Comme nous avons une matrice de corrélation carrée à 9 lignes et 9 colonnes, nous aurons 9 vecteurs propres et 9 valeurs propres.

4.3.5.2. Valeurs propres et leur variance expliquée

Les valeurs propres représentent la variance expliquée par chaque facteur. Comme nous sommes dans une ACP normée, la trace de la matrice de corrélation est égale à la somme des variances qui est l'inertie total de nuage du 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).

Les vecteurs propres et le pourcentage des variances (inertie) sont déterminés à partir du logiciel Stat Box[®] conformément aux relations (3.17) et (3.19) respectivement. Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.13 ci-dessous :

Tableau 4.13 : Valeurs propres et leur variance associée.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	Somme
Valeur propre	2.38	1.66	1.52	0.93	0.84	0.65	0.44	0.37	0.20	9.00
% variance	26.48	18.47	16.92	10.34	9.29	7.22	4.87	4.16	2.25	100.00
% cumulé	26.48	44.95	61.87	72.21	81.50	88.72	93.59	97.75	100.00	

On remarque que la somme des valeurs propres est égale à p nombre des variables. Effectivement comme les variables sont centrées réduites (qui est l'option par défaut du logiciel Stat Box[®]), la variance de chaque variable valait 1. Donc l'inertie totale est alors égale à p le nombre de variables de départ.

Les vecteurs dont $\lambda > 1$ sont : F1, F2 et F3

Le premier axe présente un taux d'inertie de 26.48% ;

Le deuxième axe présente un taux d'inertie de 18.47 % ;

Le troisième axe présente un taux d'inertie de 16.92% ;

Le Critère de Kaiser nous conduit à retenir **3 axes**

Visualisons le diagramme des valeurs propres (figure 4.1) :

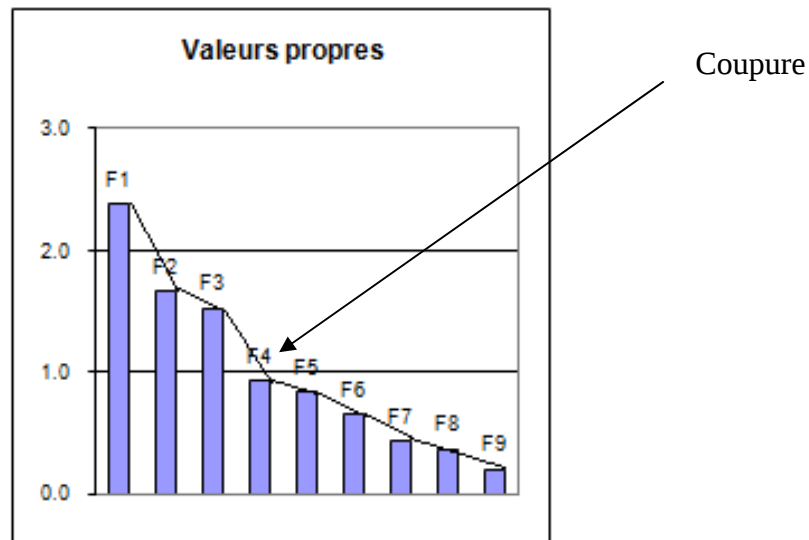


Figure 4.1 : Diagrammes des Valeurs propres.

La règle de coude consiste à couper l'éboulis des valeurs propres à l'endroit où celui-ci possède un coude. Son but est d'obtenir le maximum d'inertie conservée avec le minimum de facteurs. On observe une chute importante à partir du 3^{ème} axe (de 16.92% à 10.34% de l'inertie). Nous retenons 3 axes, ce qui représente presque 62% de l'inertie totale.

4.3.6. Etudes des variables

4.3.6.1. 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 Stat Box[®] (tableau 4.14) conformément à la relation (3.21) ; 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 absolue, 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 4.14 : Coordonnées factorielles des variables.

	F1	F2	F3
Zone sismique	0.81	-0.20	0.21
Type de sol	0.73	0.07	-0.01
Action de vent	-0.37	0.53	0.60
Type de la structure	-0.45	0.23	0.63
Etanchéité de la paroi	0.33	0.51	0.31
Etanchéité de la couverture	0.17	0.67	-0.32
Défauts apparents	0.41	0.71	-0.37
Rôle de réservoir	-0.35	0.01	-0.46
Importance de l'ouvrage	0.65	-0.24	0.43

Les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 1 sont :

"zone sismique", "type de sol" et "importance de l'ouvrage".

Les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 2 sont :

"Etanchéité de paroi", "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents".

Les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 3 sont :

"Action de vent", "type de la structure" et "rôle du réservoir".

4.3.6.2. Contribution relatives des variables à l'inertie des axes

La contribution relative des variables à l'inertie des axes est donnée par le logiciel Stat Box[®]. Les résultats sont illustrés dans le tableau 4.15 ci-dessous :

Tableau 4.15 : Contribution des variables à l'inertie des axes.

	F1	F2	F3
Zone sismique	27.51	2.36	2.87
Type de sol	22.28	0.29	0.01
Action de vent	5.60	17.21	23.25
Type de la structure	8.52	3.31	26.17
Etanchéité de la paroi	4.69	15.94	6.37
Etanchéité de la couverture	1.16	27.18	6.63
Défauts apparents	7.12	30.13	8.92
Rôle de réservoir	5.16	0.01	13.79
Importance de l'ouvrage	17.96	3.58	11.99
	100.00	100.00	100.00

Les trois variables "zone sismique", "type de sol" et "importance de l'ouvrage" expliquent à elles seules 67.75% de la formation du premier axe.

Les trois variables "étanchéité de la paroi", "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" expliquent à elles seules 73.25% de la formation du deuxième axe.

Les trois "variables action du vent", "type de structure" et "rôle du réservoir" expliquent à elles seules 63.22% de la formation du troisième axe.

4.3.6.3. 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 indiquant la qualité de représentation de la variable sur l'axe. 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 Stat Box[®] conformément à la relation (3.29). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.16 ci-dessous :

Tableau 4.16 : Qualités des représentations des variables ($\cos^2$).

	F1	F2	F3
Zone sismique	0.66	0.04	0.04
Type de sol	0.53	0.00	0.00
Action de vent	0.13	0.29	0.35
Type de la structure	0.20	0.06	0.40
Étanchéité de la paroi	0.11	0.27	0.10
Étanchéité de la couverture	0.03	0.45	0.10
Défauts apparents	0.17	0.50	0.14
Rôle de réservoir	0.12	0.00	0.21
Importance de l'ouvrage	0.43	0.06	0.18

$r_{\text{critique}} = 0.268$. Au delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Les variables "zone sismique", "type de sol" et "importance de l'ouvrage" sont proches du premier axe factoriel et sont bien représenté sur cet axe. Les variables "action du vent", "étanchéité de la paroi", "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" sont proches du deuxième axe factoriel et sont bien représenté sur cet axe. Les variables "action du vent" et "type de structure" sont proches du troisième axe factoriel et sont bien représenté sur cet axe. Toute fois, la variable "rôle du réservoir" intervient plus dans la formation des axes qu'on a éliminés.

- 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 positivement. Dans notre cas, nous avons :

1^{er} axe F1, nous avons des corrélations positives entre :

- "zone sismique" et "type de sol" (**);
- "zone sismique" et "importance de l'ouvrage" (***);
- "importance de l'ouvrage" et "type de sol" (**).

2^{ème} axe F2, nous avons une corrélation positive entre :

- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" (***).
- "étanchéité de la paroi" et "défauts apparents" (*).

3^{ème} axe F3, nous avons une corrélation positive entre :

- "action du vent" et "type de structure" (***).

Ce qui confirme bien le bon choix de nos axes F1, F2 et F3.

- Par ailleurs, en visualisons le tableau 4.16, nous déduisons que les variables qui ont plus contribuées à la formation des axes F1, F2 et F3 respectivement sont "la zone sismique", le "défaut apparent" et "le type de structure".

4.3.6.4. Représentation des cercles de corrélations

L'examen des plans factoriels permettra de **visualiser les corrélations** entre les variables. A chaque point-variable dans le cercle des corrélations (figure 4.2, 4.3), on associe un point dont la coordonnée sur un axe factoriel est une mesure de la corrélation entre cette variable et le facteur. Dans l'espace de dimension p , la distance des points-variables à l'origine est égale à 1. Donc par projection sur un plan factoriel, les points-variables s'inscrivent dans un cercle de rayon 1 «le cercle des corrélations» 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. Attention ! 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). L'angle entre 2 point-variables, mesuré par son cosinus est égal au coefficient de corrélation linéaire entre les 2 variables conformément à la relation (3.6).

Ainsi, si les points sont très proches donc les variables qui forment un angle nul entre elles sont très fortement corrélées. Celles qui font un angle droit ne sont pas corrélées, et celles qui présentent un angle plat sont corrélées négativement donc les points sont opposés,

car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1. Plus une variable est corrélée avec un axe plus elle est proche de celui-ci.

Le cercle des corrélations (figure 4.2, 4.3) permet de voir, parmi les variables initiales, les groupes de variables très corrélées entre elles. Pour interpréter un axe, on examine les coefficients de la combinaison linéaire qui le définissent ou bien, si on préfère, on examine sa corrélation avec les anciennes variables en observant le cercle des corrélations (ou le tableau donnant ces corrélations). Une variable qui a une coordonnée faible, donc un coefficient faible, ne sert pas pour l'interprétation d'un facteur.

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

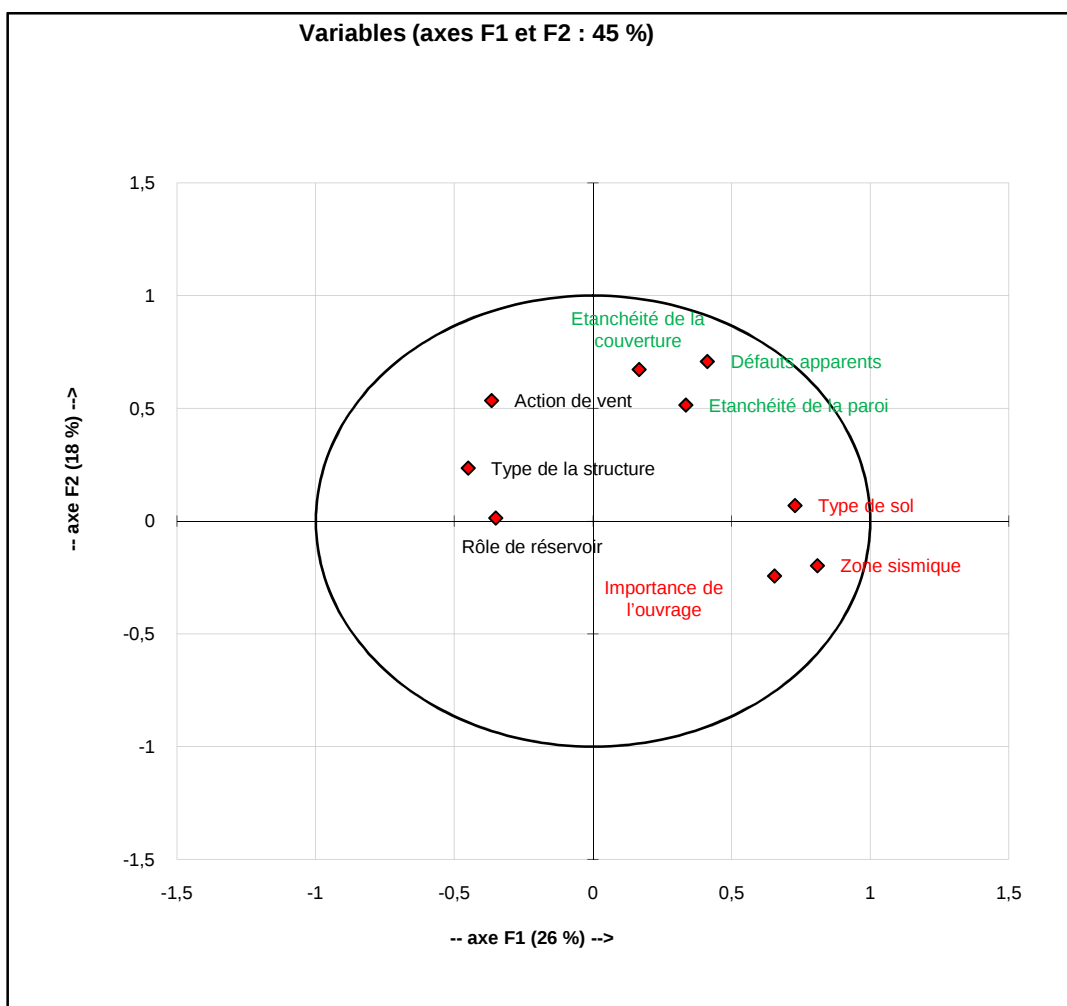


Figure 4.2 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-2).

Les variables qui sont bien représentées (celles qui sont proches du cercle de corrélation) sont : "défauts apparents", "type de sol", "zone sismique"; ce qui veut dire que ces variables sont bien corrélées avec les deux facteurs constituant ce plan.

visualisons les corrélations entre les variables :

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

- "zone sismique" et "importance de l'ouvrage" ;
- "zone sismique" et "type de sol" ;
- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" ;
- "étanchéité de la paroi" et "défauts apparents",

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 : "zone sismique", "type de sol" et "importance de l'ouvrage".

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 2 sont : "étanchéité de la couverture", "étanchéité de la paroi" et "défauts apparents".

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

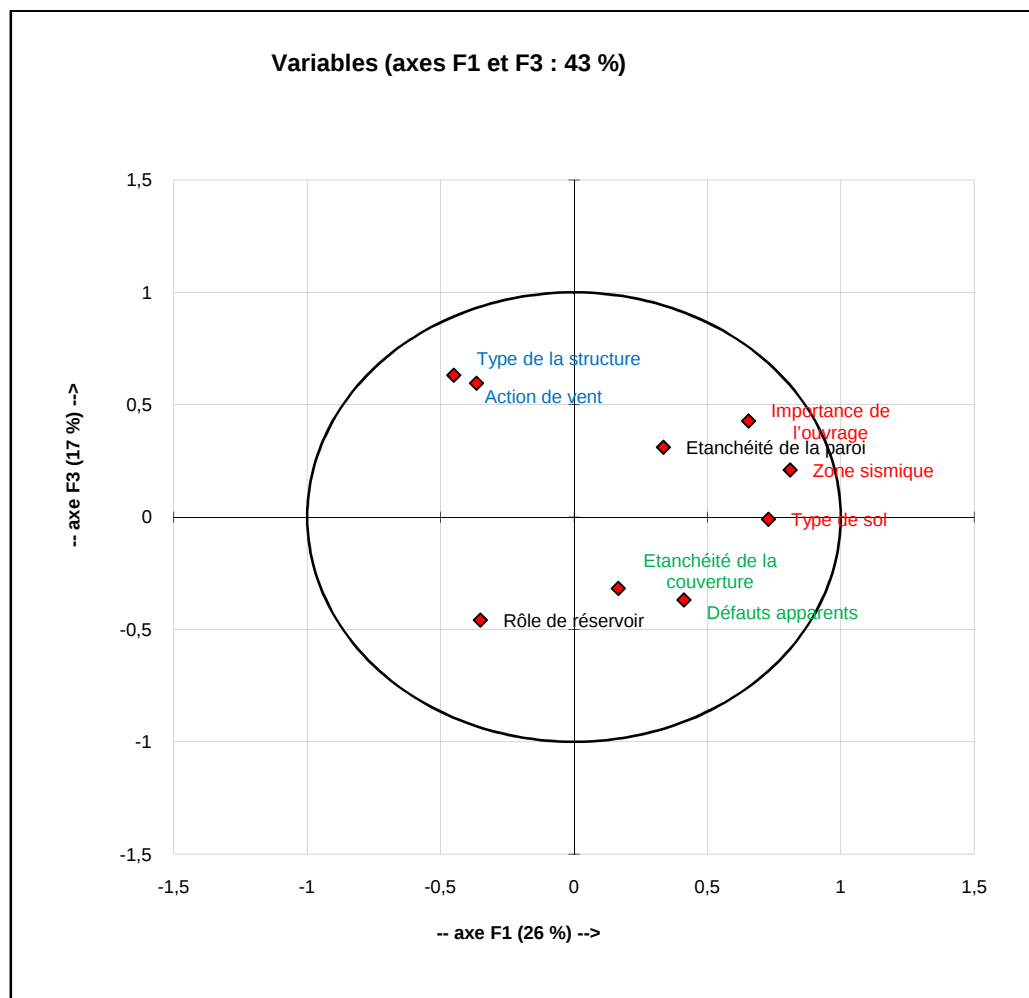


Figure 4.3 : Cercle de corrélation des variables dans le plan factoriel (1-3).

Les variables qui sont bien représentées (celles qui sont proche du cercle de corrélation) sont : "importance de l'ouvrage", "zone sismique" et "type de sol", ce qui veut dire que ces variables sont bien corrélées avec les deux facteurs constituant ce plan.

visualisons les corrélations entre les variables :

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

- "zone sismique" et "type de sol" ;
- "importance de l'ouvrage" et "zone sismique" ;
- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" ;
- "action du vent" et "type de structure".

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 : "zone sismique", "type de sol".

Les variables qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 3 sont : "action de vent", "type de la structure" et "rôle du réservoir".

➤ **Remarque :**

La lecture des cercles des corrélations nous a confirmé les conclusions retenues par l'interprétation des différents tableaux.

4.3.7. Etude des individus

4.3.7.1. Coordonnées 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 correspond au coefficient **le plus élevé en valeur absolue**.

Les coefficients de ces coordonnées factorielles sont fournis par le logiciel Stat Box[®]. Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.17 ci-dessous :

Tableau 4.17 : Coordonnées factorielles des individus.

N°	F1	F2	F3
1	-0.29	1.86	-0.75
2	-1.08	-0.99	-2.36
3	0.36	0.62	0.15
4	-1.49	-0.21	-2.77
5	-2.76	0.25	0.06
6	-1.41	1.59	1.64
7	-1.87	-0.45	0.43
8	0.25	1.05	-1.64
9	-0.21	-2.48	-1.02
10	-1.93	-1.66	-0.97

11	-0.79	0.82	1.61
12	-1.33	-1.01	0.90
13	-2.19	-0.77	-0.53
14	-0.21	1.37	-0.75
15	-1.26	0.29	1.92
16	-1.24	-1.17	-0.10
17	-2.77	-0.84	-0.51
18	-0.70	0.00	-2.75
19	-1.58	-0.20	1.48
20	-0.07	3.09	-1.02
21	-0.68	1.40	0.11
22	0.73	3.00	1.42
23	-0.51	-1.49	0.82
24	3.43	0.48	1.77
25	2.46	-0.59	1.95
26	0.62	-0.85	1.41
27	0.36	-1.57	1.47
28	1.20	1.81	0.72
29	-0.16	0.74	0.85
30	4.14	-0.66	-0.58
31	3.58	-1.96	1.12
32	0.58	1.01	-0.76
33	1.78	-1.03	-2.04
34	1.06	0.99	0.01
35	-0.52	1.07	-1.08
36	-1.88	-1.32	0.31
37	0.68	0.28	0.28
38	0.04	0.98	-0.50
39	0.31	-1.33	0.83
40	-0.37	1.21	-0.03
41	0.58	2.17	-1.34
42	1.93	-1.54	0.28
43	-0.14	1.39	0.95
44	-0.85	0.24	0.29
45	-0.43	-0.62	-0.06
46	-0.72	-1.92	0.48
47	-1.38	-0.94	0.28
48	-0.50	-1.12	1.70
49	-0.63	-0.95	1.13
50	2.90	-0.79	-0.88
51	3.04	-1.35	-2.64
52	0.72	1.38	0.05
53	0.73	0.10	-1.75
54	0.43	0.63	0.43

Les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 1 sont :

5, 7, 10, 12, 13, 16, 17, 19, 24, 25, 30, 31, 34, 36, 37, 42, 44, 47, 50 et 51 ;

Les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 2 sont :

1, 3, 9, 14, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 32, 38, 40, 41, 43, 45, 46, 52 et 54 ;

Les individus qui ont le plus contribué à la formation de l'axe 3 sont :

2, 4, 6, 8, 11, 15, 18, 26, 29, 33, 35, 39, 48, 49 et 53 ;

4.3.7.2. Contribution relatives des individus à l'inertie des axes

La contribution relative des individus à l'inertie des axes est donnée par le logiciel Stat Box[®]. Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.18 ci-dessous :

Tableau 4.18 : Contribution des variables.

	F1	F2	F3
1	0.06	3.86	0.69
2	0.90	1.09	6.78
3	0.10	0.43	0.03
4	1.72	0.05	9.30
5	5.92	0.07	0.00
6	1.53	2.80	3.26
7	2.70	0.22	0.22
8	0.05	1.23	3.25
9	0.03	6.86	1.27
10	2.89	3.07	1.15
11	0.49	0.75	3.14
12	1.37	1.13	0.99
13	3.72	0.67	0.34
14	0.03	2.09	0.68
15	1.24	0.10	4.47
16	1.20	1.53	0.01
17	5.97	0.79	0.32
18	0.38	0.00	9.17
19	1.93	0.04	2.66
20	0.00	10.66	1.26
21	0.36	2.18	0.01
22	0.42	10.03	2.44
23	0.20	2.46	0.82
24	9.16	0.25	3.81
25	4.72	0.39	4.62
26	0.30	0.80	2.40
27	0.10	2.76	2.62
28	1.11	3.66	0.63
29	0.02	0.61	0.87
30	13.31	0.48	0.40
31	9.96	4.28	1.53
32	0.26	1.14	0.70
33	2.48	1.17	5.04
34	0.87	1.09	0.00
35	0.21	1.27	1.41
36	2.76	1.94	0.11
37	0.36	0.08	0.10
38	0.00	1.08	0.30
39	0.08	1.97	0.84
40	0.11	1.63	0.00
41	0.26	5.24	2.19
42	2.91	2.63	0.09
43	0.01	2.14	1.10
44	0.56	0.06	0.10
45	0.14	0.43	0.00
46	0.41	4.09	0.28
47	1.47	0.99	0.10
48	0.19	1.41	3.50

49	0.31	1.01	1.55
50	6.56	0.70	0.95
51	7.18	2.04	8.50
52	0.40	2.11	0.00
53	0.41	0.01	3.74
54	0.14	0.44	0.22

Les quinze individus 5, 7, 12, 13, 17, 24, 25, 30, 31, 36, 37, 42, 44, 47 et 50 expliquent à eux seuls 76.08% de la formation du premier axe.

Les vingt trois individus 1, 3, 9, 10, 14, 16, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 32, 34, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 46, 52 et 54 expliquent à eux seuls 64.75% de la formation du deuxième axe.

Les seize individus 2, 4, 6, 8, 11, 15, 18, 19, 26, 29, 33, 35, 48, 49, 51 et 53 expliquent à eux seuls 53.35% de la formation du troisième axe.

4.3.7.3. Qualités 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. Plus une corrélation entre un individu et un axe est forte, plus l'individu est proche de l'axe.

La qualité de représentation des individus est déterminée à partir du logiciel Stat Box[®] conformément à la relation (3.29). Les résultats sont illustrés sur le tableau 4.19 ci-dessous :

Tableau 4.19 : Qualités des représentations des individus ($\cos^2$).

	F1	F2	F3
1	0.01	0.62	0.10
2	0.12	0.10	0.59
3	0.02	0.07	0.00
4	0.19	0.00	0.66
5	0.86	0.01	0.00
6	0.16	0.20	0.22
7	0.41	0.02	0.02
8	0.01	0.15	0.37
9	0.00	0.45	0.08
10	0.35	0.26	0.09
11	0.11	0.11	0.44
12	0.34	0.19	0.16
13	0.68	0.09	0.04
14	0.01	0.23	0.07
15	0.17	0.01	0.40

16	0.22	0.19	0.00
17	0.86	0.08	0.03
18	0.04	0.00	0.65
19	0.33	0.01	0.29
20	0.00	0.53	0.06
21	0.07	0.30	0.00
22	0.04	0.65	0.14
23	0.06	0.51	0.16
24	0.70	0.01	0.19
25	0.36	0.02	0.22
26	0.08	0.16	0.43
27	0.02	0.29	0.25
28	0.17	0.38	0.06
29	0.00	0.10	0.13
30	0.84	0.02	0.02
31	0.65	0.19	0.06
32	0.06	0.20	0.11
33	0.26	0.09	0.34
34	0.21	0.19	0.00
35	0.04	0.17	0.17
36	0.52	0.26	0.01
37	0.15	0.03	0.03
38	0.00	0.13	0.03
39	0.01	0.14	0.05
40	0.02	0.25	0.00
41	0.02	0.31	0.12
42	0.32	0.20	0.01
43	0.00	0.29	0.14
44	0.27	0.02	0.03
45	0.11	0.24	0.00
46	0.08	0.56	0.04
47	0.19	0.09	0.01
48	0.03	0.18	0.40
49	0.11	0.24	0.34
50	0.62	0.05	0.06
51	0.42	0.08	0.32
52	0.12	0.46	0.00
53	0.11	0.00	0.62
54	0.08	0.16	0.08

$r_{\text{critique}} = 0.268$. Au delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives.

Les individus 5, 7, 10, 12, 13, 17, 19, 24, 25, 30, 31, 36, 42, 44, 50 et 51 sont proches du premier axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

Les individus 1, 9, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 41, 43, 46, et 52 sont proches du deuxième axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

Les individus 2, 4, 8, 11, 15, 18, 19, 26, 33, 48, 49, 51 et 53 sont proches du troisième axe factoriel et sont bien représentés sur cet axe.

Les individus 3, 6, 14, 16, 29, 32, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 45, 47 et 54 interviennent plus dans la formation des axes que nous avons éliminés.

4.3.7.4. Projection des individus dans les plans factoriels

L'examen des 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.

La Projection de nos individus (réservoirs) au nombre de 54 sont projetés dans les plans factoriels 1-2 (figure 4.4) et 1-3 (figure 4.5) respectivement.

a. Plan factoriel (1- 2)

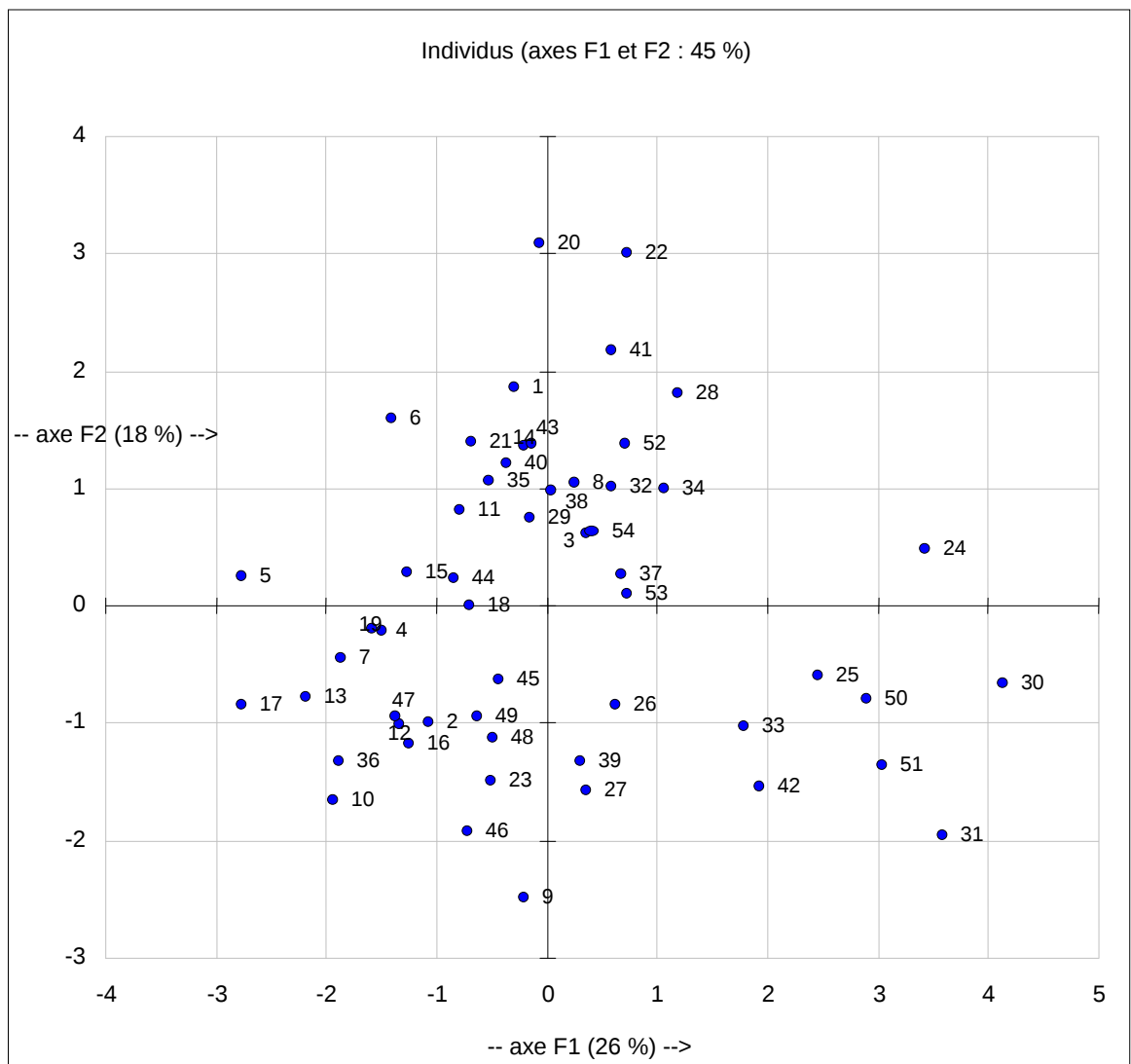


Figure 4.4 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1- 2).

Les individus qui sont bien représentés sont loin du centre de gravité. Nous distinguons les individus auxquels sont affectés les numéros suivants (Tableau 4.1) :

1, 5, 9, 10, 17, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 31, 33, 36, 42, 41, 46, 50 et 51; ce qui veut dire que ces individus sont éloignés dans l'espace, sont bien dispersés.

b. Plan factoriel (1- 3)

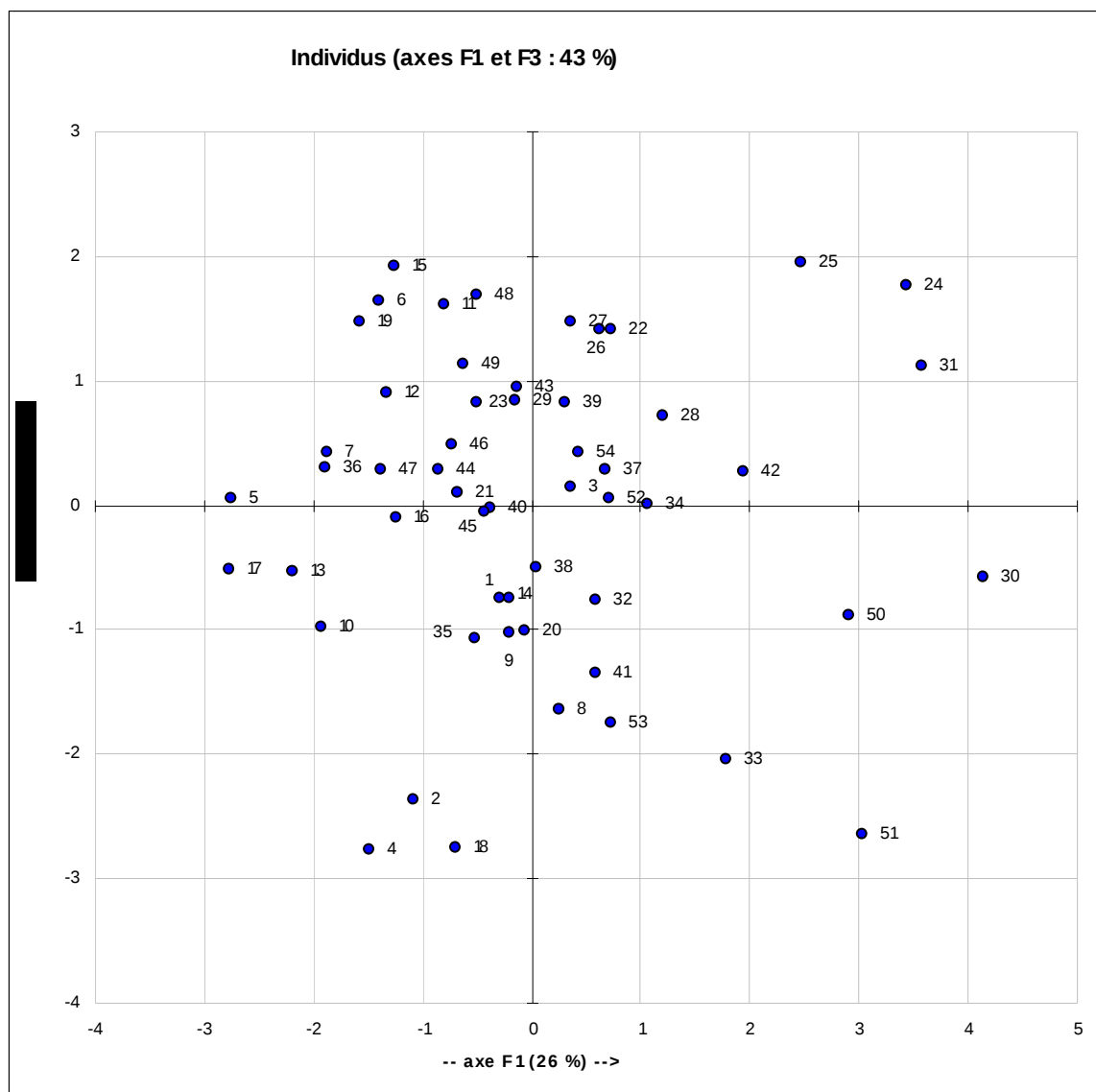


Figure 4.5 : Représentation des individus dans le plan factoriel (1- 3).

Les individus qui sont bien représentés (ceux qui sont loin du centre de gravité) sont donnés ci après conformément au tableau 4.1:

2, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 24, 25, 28, 30, 31, 33, 42, 48, 50, 51 et 52 ; ce qui veut dire que ces individus sont éloignés dans l'espace, sont bien dispersés.

4.3.8. Lien entre les deux études

L'examen de ces graphiques permettra d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables.

Pour la construction des groupes d'individus nous nous basons sur les individus qui ont des corrélations significatives ($> r_{\text{critique}}$) avec les axes considérés. L'utilisation des variables permettra de caractériser ces différents groupes.

Puisque nous avons deux axes, nous aurons 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)

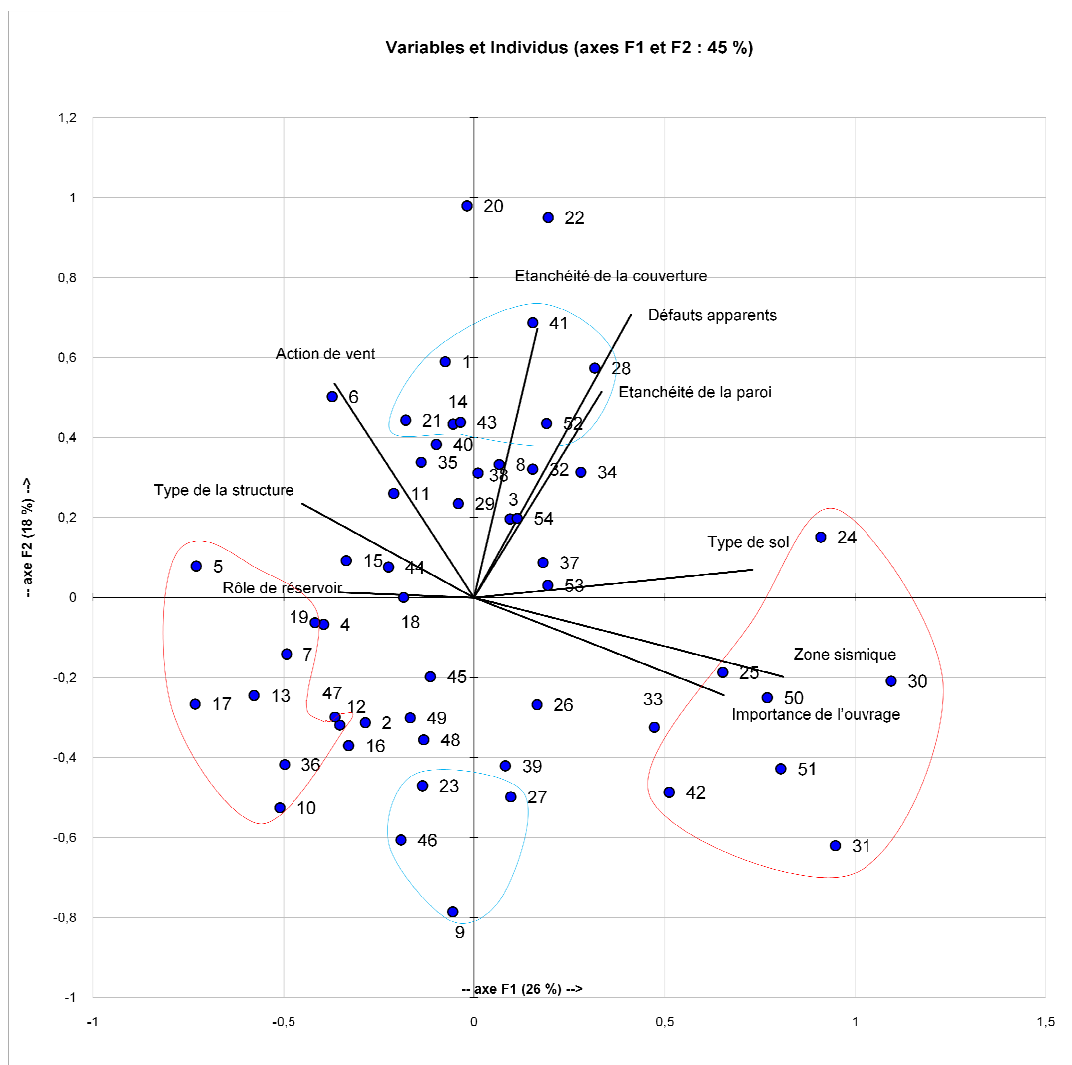


Figure 4.6 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1-2).

➤ **l'axe 1 (couleur rouge)**

Le premier groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 1 sont positives contient les individus suivants : 24, 25, 30, 31, 42, 50 et 51.

Le deuxième groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 1 sont négatives contient les individus suivants : 5, 10, 12, 13, 17, 19, 36.

Nous savons que les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 1 sont la "zone sismique", "le type de sol" et "l'importance de l'ouvrage". Leurs coordonnées sur l'axe 1 sont positives (elles se trouvent à droite de l'axe). De ce fait, nous déduisons que ce sont ces deux groupes d'individus qui ont contribué à la corrélation de ces variables. Le groupe d'individus qui se trouve à droite ont de fortes valeurs pour ces variables et ceux qui se trouvent à gauche ont de faibles valeurs pour ces variables ; comme le montre le cas des individus 5 et 51 du tableau 4.20.

Tableau 4.20 : Contribution des variables à la formation de l'axe 1.

	Zone sismique	Type de sol	Importance de l'ouvrage
Boudjlil N°5	2	3	1
chef lieu 2 Mekla N°51	6	12	3

➤ **l'axe 2 (couleur bleu)**

Le premier groupe d'individus, dont les coordonnées sur l'axe 2 sont positifs contient les individus suivants : 1, 14, 21, 28, 41, 43, 52.

Le deuxième groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 2 sont négatifs contient les individus suivants : 9, 23, 27, 46.

Nous savons que les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 2 sont "étanchéité de la paroi", "étanchéité de la couverture" et "défaut apparents". Leurs coordonnées sur l'axe 2 sont positives (elles se trouvent en haut de l'axe).

Le groupe d'individus qui se trouve en haut ont de fortes valeurs pour ces variables, et celui qui se trouve en bas ont de faibles valeurs pour ces variables.

b. projection des individus et variables dans le plan factoriel 1- 3

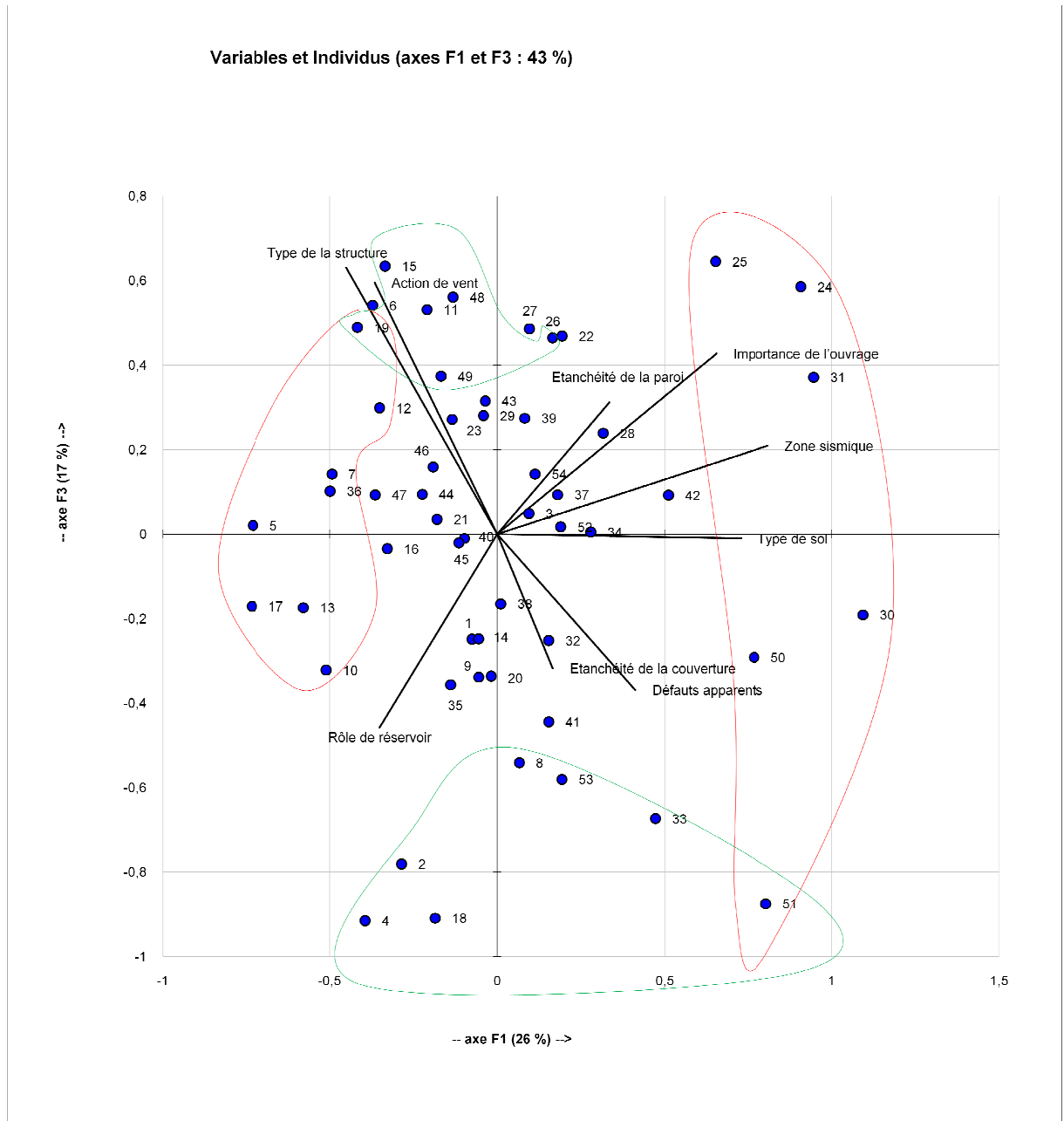


Figure 4.7 : Représentation des variables et individus dans le plan factoriel (1et 3).

➤ l'axe 1 (couleur rouge)

Dans ce plan factoriel 1-3 nous retrouvons les mêmes informations concernant les individus et les variables avec le plan factoriel 1-2.

➤ l'axe 3 (couleur verte)

Le premier groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 3 sont positives contient les individus suivants : 11, 15, 19, 22, 48, 49.

Le deuxième groupe d'individus dont les coordonnées sur l'axe 3 sont négatives contient les individus suivants : 2, 4, 8, 18, 33, 51, 53.

Nous savons que les variables qui ont plus contribué à la formation de l'axe 3 sont "action du vent" et "type de structure". La figure 4.7 montre que les coordonnées de ces variables sont positives. Elles se trouvent ainsi en haut de l'axe 3.

De ce fait, le groupe d'individus se trouvant en haut de l'axe 3 ont de fortes valeurs pour ces variables, et celui qui se trouve en bas ont de faibles valeurs pour ces variables.

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 4.7). Nous pouvons alors dire que les individus se trouvant dans un même groupe se ressemblent du point de vu de ces variables.

Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons analysé les 13 paramètres (environnementaux, structuraux et fonctionnels), pris en considération dans le calcul de l'indice de vulnérabilité I_v , à l'échelle d'un parc de 54 réservoirs ; par la méthode d'analyse en composante principale (ACP). Comme nous l'avons montré en section (4.2.1), 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 au préalable la factorisation des données. Celle-ci consiste à vérifier la présence d'un lien entre les variables par la présence de corrélations significatives ; qui nous permettra d'extraire les composantes principales. Pour déduire ce lien, 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 0.268. 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, d'abord le critère du coude de Cattell, qui consiste à rechercher le point (un décrochement ou coude) de cassure qui représente le nombre de facteurs au-delà duquel l'information ajoutée est peu pertinente ; puis le critère de Kaiser, qui consiste à ne retenir que les axes associés à des valeurs propres supérieures à 1. Dans notre cas, nous avons retenu trois axes principaux F1, F2 et F3. Ces axes présentent 62% de l'inertie totale (c-à-d de 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 formations des trois axes principaux **F1, F2 et F3** sont corrélées positivement ; ce qui confirme *le bon choix de ces axes* :

1^{er} axe F1, nous avons des corrélations positives entre :

- "zone sismique" et "type de sol" (**);
- "zone sismique" et "importance de l'ouvrage" (***);
- "importance de l'ouvrage" et "type de sol" (**).

2^{ème} axe F2, nous avons une corrélation positive entre :

- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" (***).
- "étanchéité de la paroi" et "défauts apparents" (*).

3^{ème} axe F3, nous avons une corrélation positive entre :

- "action du vent" et "type de structure" (***).

Par ailleurs, les résultats des corrélations montrent que les variables qui ont le **plus** contribué à la formation des axes F1, F2 et F3 respectivement sont la zone sismique, le défaut apparent et le type de structure. La lecture des cercles des corrélations (graphique variables) nous a confirmé les conclusions retenues par l'interprétation des différents résultats. Cependant, les variables n'ayant pas participé à la formation de ces axes, ont plus contribué à la formation des axes éliminés telle que le rôle du réservoir.

D'autre part, la qualité de représentations des individus est déterminée de la même manière, à partir du seuil minimal $r_{\text{critique}} = 0.268$. Au delà de cette valeur toutes les corrélations sont significatives. Plus une corrélation entre un individu et un axe est forte, plus l'individu est proche de l'axe donc sera bien représenté sur cet axe. Par ailleurs, l'examen des graphiques des variable individus a permis d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables. C-à-d 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 4.7). Nous pouvons alors dire que les individus se trouvant dans un même groupe se ressemblent du point de vu de ces variables. Nous pouvons décomposer le parc étudié en trois ensembles composés chacun groupe d'individus semblables comme suit :

Ensemble 1 : les réservoirs Ait hague (LNI), Ait yacoub (LNI), Mestigua (LNI), SR1 (LNI), Taksebt (LNI), Tamazirt 1 (LNI), Tamazirt 2 (LNI), SR2 (Sidi Naaman), Ait saada ourazki (Tadmait), Menacera (Tirmitine), Chef lieu 1 (Mekla), SR1 Chaib(Mekla), SR3 Djamaa N Saridj (Mekla) se ressemblent du point de vu des variables action du vent et type de la structure, puisqu'ils ont contribué à leur corrélation.

Ensemble 2 : Les réservoirs Boudjlil (LNI), Mehriz (LNI), Monobloc 2 (LNI), SR2 (LNI), SR3 (LNI), Tansaout (LNI), Tamazirt 2 (LNI), Touaresse (DBK), SR1 (Sidi Naaman), Chef lieu 2 (Tadmait), Kef laagab (Tadmait), Herrouka 1 (Tirmitine), Chef lieu 2 (Mekla), SR1 Chaibe (Mekla) se ressemblent du point de vu des variables zone sismique, type de sol et importance de l'ouvrage, puisqu'ils ont contribué à leur corrélation.

Ensemble 3 : Les réservoirs Adnis (LNI), Monobloc 1 (LNI), Taghanimt (LNI), Taghanimtt (LNI), Mouldiouane village (DBK), Chef lieu (Sidi Naaman), Maassal (Sidi Naaman), SR2 (Sidi Naaman), Kef laagab (Tadmait), Ait saada bas (Tadmait), Telta 2 (Tadmait), Avarane 2 (Tirmitine), Herrouka 2 (Tirmitine), Megdoul 1 (Tirmitine), SR2 Djamaa N Saridj (Mekla) se ressemblent du point de vu des variables étanchéité de la couverture, étanchéité de la paroi et défauts apparents.

Conclusion Générale

Afin de réduire les pertes et les dommages des structures sous l'effet de certains aléas naturels (neige, vent, séisme ... etc.), plusieurs approches d'évaluation de la vulnérabilité d'une structure donnée ont été développées ; à savoir les méthodes physiques, les méthodes par sureté de fonctionnement, les méthodes par expertise et enfin méthodes statistiques. Ces approches diffèrent les unes des autres en coût, en moyens utilisés et en précision. Le choix du type d'approche dépend de l'objectif de l'évaluation, de la disponibilité des données et de la technologie utilisée.

Dans ce mémoire, nous avons présenté les méthodes les plus connues d'estimation de la vulnérabilité, et tout particulièrement la méthode d'expertise développée par (Hammoum et al. 2012), pour évaluer rapidement la présomption de vulnérabilité d'un réservoir donné en béton vis-à-vis de certains aléas naturels (vent, neige, séisme,...etc.), par la détermination d'un indice de vulnérabilité I_v . Celle-ci fait intervenir treize (13) paramètres influents pour trois types d'analyses (environnementale, structurelle et fonctionnelle).

Cette méthode d'indice a été testée avec succès à l'échelle d'un parc de 54 réservoirs que nous avons expertisé dans différentes daïra (Larbaa Nath Irathen, Draa Ben Khdda, Mekla) de la wilaya de Tizi Ouzou. Des fiches d'enquêtes conçues spécialement pour le terrain (Bouhadoun et al, 2011) ont été renseignées lors de nos différentes missions de terrain, que nous avons effectuées durant les années 2013-2014, et ce pour récolter l'ensemble des informations nécessaires au calcul des indices de vulnérabilité des différents ouvrages.

En s'inspirant des travaux de différentes méthodes suscitées, tout particulièrement pour l'analyse des risques à partir des statistiques, nous avons utilisé, pour la première fois, une méthode dite ACP pour analyser les différents paramètres influents, pris en compte dans le calcul de l'indice de vulnérabilité. Cette méthode permet d'une part d'identifier les paramètres les plus influents et d'autre part de rendre l'information moins redondante.

Nous avons procédé au traitement d'un tableau de données rectangulaires avec des individus (réservoirs) en lignes et des variables quantitatives (paramètres) en colonnes. Vu la dimension de cette matrice (54 lignes et 14 colonnes), nous avons fait appel au logiciel Stat Box[®] pour la conception des différents graphiques et organigramme. Ce dernier nous a permis d'analyser les résultats, et d'en ressortir ce qui suit :

- La qualité de représentation des variables et individus est déterminée à partir du logiciel Stat Box[®]. Le seuil minimal du risque d'erreur obtenue $r_{critique}$ est égale à 0.268. Au delà de cette valeur toutes les corrélations entre variables sont significatives.
- Les résultats obtenus montrent que les variables ayant contribué à la formation des trois axes principaux retenus **F1**, **F2** et **F3**, pour un taux d'information de 62% suivant les

critères du coude de Cattell et le critère de Kaiser, sont corrélées positivement ; ce qui confirme *le bon choix de nos axes* :

1^{er} axe F1, nous avons des corrélations positives entre :

- "zone sismique" et "type de sol" (**);
- "zone sismique" et "importance de l'ouvrage" (***);
- "importance de l'ouvrage" et "type de sol" (**).

Les paramètres "zone sismique", "type de sol" et "importance de l'ouvrage" sont physiquement indépendants même s'ils présentent une corrélation qui désigne une liaison, ou une combinaison linéaire entre eux.

2^{ème} axe F2, nous avons une corrélation positive entre :

- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents" (***).
- "étanchéité de la paroi et défauts apparents" (*).

3^{ème} axe F3, nous avons une corrélation positive entre :

- "action du vent et type de structure" (***).

Nous remarquons que la corrélation entre les paramètres ayant contribué à la formation des axes F2 et F3 sont physiquement dépendants, c à d qu'il existe un lien physique et réel entre ces différents paramètres :

- "étanchéité de la couverture" et "défauts apparents",
- "étanchéité de la paroi" et "défauts apparents".
- "action du vent" (dépendant de la forme de la structure) et le "type de la structure".

- L'examen des graphiques variables individus nous a permis, par ailleurs d'identifier les groupes d'individus ayant pris des valeurs proches sur certaines variables, c.à.d. que les individus appartenant à un même groupe ont contribué à la corrélation de ces variables et se ressemblent du point de vues de ces variables ; comme nous l'avons détaillé en conclusion du chapitre 4.

Perspectives

A l'issu de ce travail de recherche, plusieurs pistes s'ouvrent à nous et qui peuvent constituer de potentielles perspectives pour de futurs travaux de recherches (thèses) :

- Afin de valoriser les corrélations obtenues pour les différents paramètres pris en compte par (Hammoum, 2012), pour le calcul de l'indice de vulnérabilité, il nous semble important d'étudier les liaisons linéaires existantes entre ces derniers. Ceci nous 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.
- Il serait intéressant de créer un vecteur, que nous pourrions appeler « **vecteur de référence** », qui nous permettrait de reconstituer le cycle de vie de chaque individu (réservoir) du même parc.

AIT L'HADJ L. Analyse non linéaire d'un immeuble surmonté d'un réservoir d'eau potable, par la méthode Pushover, Mémoire de master 2 en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.

AUGUSTI G, CIAMPOLI M, Heritage buildings and seismic reliability. Progress in Structural Engineering and Materials, vol 2, n°2, pp 225-237, 2000.

BARA O, TAREK K, DJEGHABA M. Analyse en Composante Principale Multi-Echelle Non Linéaire pour la détection de défauts avec applications aux paramètres de pollution de la région d'Annaba, Département Electronique, Université Badji-Mokhtar, Annaba. 2009.

BELHEOUANE F.I. Détermination de l'indice de vulnérabilité pour les bâtiments en béton armé, Mémoire de Magister en génie civil, Université de Blida, juin 2006.

BENZECRI J-P. Analyse des données T2, Université de Paris, Ed. Dunod, Paris, Bruxelles Montréal, 1973.

BERTRAND F, MAUMY M, FUSSLER L, KOBES N, SAVARY S, GROSMAN J. Analyses factorielles et régressions logistiques réalisées à partir de données récoltées dans le cadre de l'observatoire national des maladies du bois de la vigne. 39ème Journées de statistique de la SFdS, Angers, France ,2007.

BOUHADOUN D, BELKACEM F. Evaluation d'un patrimoine de réservoirs par la détermination de l'indice de vulnérabilité dans un système d'information géophysique, Mémoire de master 2 en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.

BOUKAIS S. Etude d'un échantillon d'eau tronconique de capacité 1500 m³ implanté à Benrahmoune, Boumerdes, Mémoire d'ingénieur en génie civil, CHA, USTHB, 2012.

CREMONA C. Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants. Association Française de Génie Civil, 451 p, 2002.

CURT C, PEYRAS L, BOISSIER D. Formalisation et intégration des connaissances pour l'évaluation de la performance des barrages. 15^{ème} Congrès Lambda Mu, Lille, France. Institut pour la maîtrise des risques et la sûreté de fonctionnement, Bagneux (France), Octobre 2006.

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

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

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

DUBY C, ROBIN S. Analyse en Composantes Principales, Institut National Agronomique Paris – Grignon, 2006.

DUCROT B., FARGEOT B., MATHIEU G. L'étanchéité des ouvrages en béton de stockage et de transport de l'eau, partie 2, Annales du BTP, Editions ESKA, N° 04, sept. – oct. 1999.

DUMOLARD P. Données géographiques, analyse statistique multivariée, Lavoisier, Paris, Géot 315, 2011.

DURAND C. L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité, Notes de cours et exemples, Université de Montréal département de sociologie, 2003.

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

FONTAINE A. Diagnostic des exploitations maraichères du projet Gamour, Mémoire de master 2 en Génie Urbain et Environnement, Université Bretagne, Saint-Denis, 2009.

FRANÇOIS B. Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multiusages et changement climatique, Modèles, projections et incertitudes, Thèse de doctorat en Terre, Univers et Environnement, Université de Grenoble, 2013.

GOUET J-P. PHILIPPEAU G. Les comparaisons de moyennes et de variances. Application à l'agronomie, LAVOISIER S.A.S, 56p, 1986.

GUILLE A, PONGE J-F. Application de l'analyse des correspondances à l'étude du peuplement benthique de la cote catalane française, annales de l'institut Océanographique 51 , pp 223-235, 1975.

HAMITOUCHE S. Expertise d'un immeuble-réservoir de capacité 1000 m³ en zone sismique avec programme de réhabilitation, Mémoire de master 2 en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2012.

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.

HAMMOUM H, BOUZELHA K, AIT AIDER. H, HANNACHI. N E. Tanks criticality assessment by the dependability method. Case study, Engineering Failure Analysis, Ed. Elsevier, 41 (2014) 10–22, (<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.016>).

HAMMOUM H, BOUZELHA K, BOUHADOUN D, BELKACEM F. Evaluation de la vulnérabilité aux aléas naturels d'un parc de réservoirs en béton dans un système d'information géographique, Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2011, Ed. Curran Associates, Inc., New York, USA, décembre 2011, Volume 1, pp. 271-281, ISBN: 978-1-61839-218-3 (www.proceedings.com).

HAMMOUM H, BOUZELHA K, HANNACHI N.E. Analyse hydrodynamique d'un réservoir circulaire en béton armé, posé au sol, annales du BTP, N° 2-3, Paris, avril – juin 2010, Editions ESKA, (<http://congres.eska.fr/pdf/ABTP%202-3%202010.pdf>), ISSN 1270-9840, Paris. pp. 13-22.

HAMMOUM H, BOUZELHA K, HANNACHI N.E. Analyse d'un scénario de vieillissement de deux réservoirs jumelés par un calcul aux états limites, annales du BTP, N° 5, 2012, Editions ESKA, Paris. pp. 51-60. ISSN 1270-9840. (www.eska.fr).

HAMMOUM H, BOUZELHA K, HANNACHI N.E, SERRE D. Vulnerability assessment of the concrete tanks storage at natural hazards, in : M. Grantham, V. Mechtcherine, U. Schneck (Eds.), Concrete solutions, Ed. Taylor and Francis Group CRC Press, London, United Kingdom, 2012, pp. 45–53., ISBN : 978-0-415-61622-5. (www.crcpress.com).

HOUSNER G. W. Dynamic analysis of fluids in containers subjected to acceleration, in Nuclear Reactors and Earthquakes, Report No. TID 7024, U. S. Atomic Energy Commission, Washington DC, 1963.

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

LAFFLY D. Cours de Régression multiple : principes et exemples d'application, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2006.

LEFEBVRE J. Introduction aux analyses statistiques multidimensionnelles, 2ème édition Masson, Paris, 1980.

LIVAOGLU R, DOGANGUN A. Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid–structure–soil interaction, Journal of Fluids and Structures, pp 421–439, 2006.

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

MATHIEU G. et al. Recommandations professionnelles pour le calcul, la réalisation et l'étanchéité de réservoirs, cuves, bassins, châteaux d'eau enterrés, semi-enterrés, aériens, ouverts ou fermés, Annales ITBTP N° 486, 1990.

PEYRAS L, Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - développement de méthodes d'aide à l'expertise, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II, 2003.

PEYRAS L, BOISSIER D. Du retour d'expérience en génie civil, 13^{ème} rencontre universitaires de génie civil, 2005.

PEYRAS L, ROYET P, BOISSIER D. Dam ageing diagnosis and risk analysis: Development of methods to support expert, Can. Geotech. J. volume 43, 2006.

PHILIPPEAU G. Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principale (cours), Université Claude Bernard Lyon 1, volume 63, Novembre 1986.

RABIA A, ALIOUA M. Analyse non linéaire d'un réservoir d'eau surélevé tronconique par la méthode Pushover, Mémoire de master 2 en Génie Civil, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2013.

RAKOTOMALALA R. Cours d'analyse de corrélation, Etude des dépendances - Variables quantitatives, Université Lumière Lyon, 2012.

RAVEAUX R. Cours de statistiques : Analyse en Composantes Principales, Laboratoire L3I Université de La Rochelle, Octobre 2008.

ROGER K-V. Comment cartographier les données par l'analyse en composantes principales (cours), Faculté d'Agronomie Université de Kinshasa, République démocratique du Congo, Décembre 2009.

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>).

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.

SARRE I-A. Elaboration de programmes de dimensionnement de réservoirs en béton arme, application sur la conception des ouvrages hydrauliques en béton arme du projet d'alimentation en eau potable à Mbane en Sénégal, Thèse d'ingéniorat en Génie Civil, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2009.

SERRE D. Évaluation de la performance des digues de protection contre les inondations - Modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique, Thèse de doctorat, Université de marne la vallée, 2005.

SERRE D, PEYRAS L, CURT R.C, BOISSIER D, DIAB Y. Evaluation des ouvrages hydrauliques de génie civil, revue canadienne de géotechnique, volume 44, 2007.

SLIMANI D. Analyse du risque sismique des réservoirs surélevés par la méthode de l'indice de vulnérabilité, Thèse de master 2 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.

VANEUKEM S. Cours d'Hydraulique générale, Hydraulique appliquée à la voirie, page 136, Septembre 2009.

ZARROUK F. Cours de statistiques à distance: Etude de la relation entre deux variables (le coefficient de corrélation), Institut Supérieur Du Sport et de l'Education Physique de l'Ksar-Said en Tunisie, 2011-2012.

ZACEK M. Guide d'évaluation de la présomption de vulnérabilité aux séismes des bâtiments existants, collection conception parasismique, mai, 2004.

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

Annexe 1

Fiche d'enquête du réservoir de Mouldiouane village

1. Fiche descriptive de l'ouvrage

Wilaya : Tizi-Ouzou

Daïra : Draa Ben Khedda

Commune : Draa Ben Khedda

Lieu dit : Mouldiouane village

Coordonnées (système de projection : UTM) :

X : 559 m

Y : 382m

Date de visite : mars 2014

Capacité de l'ouvrage : 200 m³

Forme de l'ouvrage : Circulaire (X) Rectangulaire ()
Carré () Quelconque ()

Date de mise en service : 1988

Personnes rencontrées sur site : Agent

Clôture : non clôturé

Nom de l'ingénieur chargé de l'expertise :

- N MILOUDI (étudiante en magister, département génie civil)
- A ALICHE (étudiant en doctorat, département génie civil)



Figure 1.1 : Vue générale du réservoir de Mouldiouane village.

2- Evaluation environnementale

2.1. Implantation de l'ouvrage

Paramètres hydrogéologiques Pi	Au sud du pays 1	Sur la bande nord à l'ouest de pays 2	Sur la bande nord au centre de pays 3	Sur la bande nord à l'est de pays 4
Implantation de l'ouvrage Nei				
Montagne 1				X
Vallées et pleine 2				
Haut plateau et Nord de l'Atlas Saharien 2				
Grandes étendues sahariennes 3				
Région côtière 4				

2.2. Zone sismique

Lieu d'implantation Pi	Milieu désertique 1	Milieu rural 2	Zone industrielle 3	Milieu urbain 4
Zone sismique Nei				
Zone 0 1				
Zone I 1				
Zone IIa 2		X		
Zone IIb 3				
Zone III 4				

2.3. Type de sol

Les conditions de terrain Type de sol	Pi Nei	risque de liquéfaction 1	Présence de failles 2	Risque d'éboulement rocheux 3	Risque de Glissement de terrain 4
Catégorie S ₁ (Sol rocheux)	1				
Catégorie S ₂ (Sol ferme)	2				X
Catégorie S ₃ (Sol meuble)	3				
Catégorie S ₄ (Sol très meuble)	4				

2.4. Action de la neige et de sable

Les conditions de terrain Type de sol	Pi Nei	En forme de voute 1	En pente à un ou à deux versant 2	A versant multiples ou à deux redans 3	A versants multiples ou à deux redans 4
Zone D	1				
Zone C	2				
Zone B	3				
Zone A	4	X			

2.5. Action de vent

Zone de vent	Pas d'action	Zone I	Zone II	Zone III
Nei	1	2	3	4
		X		
Pi=Ph+Pc+Pt+Ps				
Hauteur de réservoir Ph	Catégorie de terrain Pc	Site topographique Pt	Etat de surface Ps	
Hauteur <5m : 0,25	Catégorie I : 0,25	Site 1 : 0,25	En arc : 0,25	
Hauteur de 5 à 10m : 0,50	Catégorie II : 0,50	X Site II : 0,50	Rectiligne : 0,50	
Hauteur de 10 à 15m : 0,75	Catégorie III : 0,75	Site III : 0,75	Circulaire : 0,75	
Hauteur >15m : 1,00	Catégorie IV : 1,00	Site IV : 1,00	X Carrée : 1,00	X

3. Evaluation structurelle

3.1. Type de structure

Les conditions de terrain Type de sol	Pi Nei	charpente métallique 1	Béton précontraint 2	Béton armé 3	Maçonnerie 4
Réservoir enterré	1				
Réservoir semi enterré	2				
Réservoir posé au sol	3			X	
Réservoir surélevé	4				

3.2. Type de fondation

Etat de tassement Type de fondation	Pi Nei	Pas de tassement 1	Début d'évolution de tassement avec arrêt 2	Tassement indiquant une évolution avancée 3	Tassement qui traduit une modification de comportement 4
Puits ou pieux	1				
Radier général	2	X			
Semelle continues	3				

3.3. Etanchéité de la paroi

Etat de l'étanchéité Type de fondation Pi Nei	Satisfaisante 1	Assez Satisfaisante 2	Moyennement satisfaisante 3	Insatisfaisante 4
Classe A 1				
Classe B 2				X
Classe C 3				
Classe D 4				

3.4. Etanchéité de la couverture

Etat de l'étanchéité Type de la couverture Pi Nei	Satisfaisante 1	Assez Satisfaisante 2	Moyennement satisfaisante 3	Insatisfaisante 4
revêtement par imprégnation de surface 1				
revêtement de type enduit 2			X	
revêtement résine synthétique 3				
revêtement par membrane 4				

3.5. Défauts apparents

Age de l'ouvrage Indice de gravité Pi Nei	Inférieur à 10 ans 1	entre 11 ans et 20 ans 2	entre 21 ans et 30 ans 3	Supérieur à 30 ans 4
Niveau 1 1				
Niveau 2 2				
Niveau 3 3			X	
Niveau 4 4				

4. Evaluation fonctionnelle

4.1. Rôle d'un réservoir dans un réseau

Etat d'accessibilité de l'ouvrage Destination de l'ouvrage Pi Nei	Accessible par route revêtue 1	Accessible par route carrossable 2	Accessible par sentier piéton 3	Retenue inaccessible 4
Réservoir brise charge ou de transit 1				
Réservoir de distribution 2	X			
Réservoir de tête 3				
Réservoir de station de pompage 4				

4.2 Importance du réservoir

Capacité de l'ouvrage Importance de l'ouvrage Pi Nei	Entre 0 et 500 m³ 1	Entre 500m³ et 1000 m³ 2	Entre 1000 m³ et 2000 m³ 3	Supérieur à 2000m³ 4
Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 3 1				
Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 2 2	X			
Le réservoir alimente des bâtiments du groupe IB 3				
Le réservoir alimente des bâtiments du groupe 1A 4				

4.3. Fréquence d'entretien

Fréquence de l'entretien Nei	Mensuelle 1	Trimestrielle 2	Semestrielle 3	Annuelle 4
				X

5. Défauts apparents



Figure 1.2 : Eclatement du béton.



Figure 1.3 : Défaut d'enrobage des aciers avec perte de section et de résistance.



Figure 1.4 : Aciers dénudés et corrodés.



Figure 1.5 : Fissures et fuites au niveau de la paroi.



Figure 1.6 : Fuite et suintement sur la paroi de l'ouvrage.



Figure 1.7 : Efflorescence sur la paroi de l'ouvrage.



Figure 1.8 : Vannes dégradées et mal entretenues.



Figure 1.9 : Chambre de vannes inondée.

Annexe 2

Présentation sommaire du logiciel Stat Box Pro 6.40

2.1. Définition

Stat Box est un logiciel d'analyse et de traitement statistique entièrement intégré dans Excel[®] et adapté au monde agricole (Gouet. 1974). Il est simple à utiliser, accessible et riche en fonctions statistiques. Ce Logiciel bénéficie d'une puissance et d'une richesse d'analyse qui permet de gagner du temps en travaillant dans un environnement familier. Il lit les données provenant d'Excel[®] et utilise ce dernier comme un éditeur de rapports. Les graphiques et les mappings sont modifiables avec l'outil de dessin d'Excel[®].

Le logiciel Stat Box[®] intègre les fonctions suivantes :

- statistiques descriptives : tris à plat et tris croisés, nombreux graphiques, box-plots, nuages, histogrammes, secteurs,
- tests paramétriques et non-paramétriques,
- de nombreux codages, ajustement à une loi de probabilité,
- prise en compte du poids des individus et des valeurs manquantes,
- **ACP**, AFC, ACM, CAH, régressions multiples, Anova, Ancova,
- prévision à court terme (lissage exponentiel Holt-Winters et méthode des 3 alphas),
- redressement, échantillonnage, MDS, Modèle linéaire général sur un nombre illimité de facteurs,
- régression logistique, neuronale, PLS, etc.,
- enfin, arbres de segmentation méthode CHAID et CART.

2.2. Historique

Stat Box[®] est un logiciel dérivant du logiciel STAT ITCF[®] édité chez Grimmersoft spécialisé dans le développement d'outils d'analyses statistiques. Grimmersoft est l'un des tout premiers éditeurs de logiciels sur micro-ordinateurs avec le lancement en 1987 d'une application de traitement d'enquêtes. L'éditeur adopte en 1991 l'interface graphique Microsoft Windows et va jouer à partir de cette date un rôle précurseur dans l'utilisation des outils de développement Microsoft. Le logiciel Stat Box[®] de Grimmersoft commercialisé est en effet le premier outil d'analyse statistique développé à partir du tableur Microsoft Excel[®]. Rapidement adopté par une large communauté d'acteurs du secteur agricole, Stat Box[®] est devenu l'outil statistique de référence pour l'analyse des essais en agriculture.

2.3. Etape de calcul d'une ACP sous Stat Box[®]

2.3.1. Lancement de Stat Box

Avant de lancer Stat Box[®], il faut d'abord lancer Excel 2003. Stat Box[®] étant intégré dans Excel[®], il est chargé automatiquement par celui-ci lors de son démarrage. Il faut donc s'assurer d'être sur la feuille contenant les données à analyser.

2.3.2. Types de données

Stat Box[®] contrôle la nature des valeurs des données en fonction de la structure algébrique de la variable attendue :

- quantitatives (numérique, continue)
- qualitatives

Les variables quantitatives ne peuvent pas comporter de texte. Les variables qualitatives peuvent comporter des valeurs numériques ou du texte, toutes les valeurs étant traitées indifféremment par Stat Box[®] sous la forme de chaînes de caractères.

2.3.3. Gestion des données

2.3.3.1. Lecture des données dans la feuille

Stat Box[®] sélectionne automatiquement les variables disponibles et leur type. De ce fait, plusieurs règles doivent être vérifiées :

- la feuille Excel[®] doit comporter uniquement nos données sous la forme d'un tableau rectangulaire (figure 2.1). Rien d'autre ne doit se trouver dans la feuille. N'ajoutez pas en bas du tableau, par exemple, des calculs complémentaires ou des commentaires. Stat Box considèrera ces informations comme appartenant au tableau de données.
- Stat Box lit les premières lignes pour identifier la nature des données : texte ou numériques. Si vous mélangez le type de données, Stat Box ne pourra fonctionner correctement.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Iv	Zone sismique	Type de sol	Action de vent	Type de la structure	Type des fondations	Etanchéité de la paroi	Etanchéité de la couverture	Défauts apparents	Rôle de réservoir	Importance de l'ouvrage					
1																
2	59.5	4	8	5.5	9	2	6	6	12	6	1					
3	42	2	8	5	6	2	2	2	8	6	1					
4	55.5	4	12	5.5	9	4	4	2	12	2	1					
5	42	2	4	5	6	2	2	6	8	6	1					
6	41	2	3	6	9	2	4	2	6	6	1					
7	47.5	2	8	6.5	9	2	8	2	6	3	1					
8	40.5	4	3	5.5	9	2	6	2	2	6	1					
9	54.5	4	8	5.5	6	2	6	4	12	6	1					
10	41	4	12	4	9	2	2	2	1	4	1					
11	41	4	6	5	9	2	2	2	2	8	1					
12	49.5	4	8	6.5	9	2	6	2	6	4	2					
13	41	4	8	6	9	2	2	2	2	4	2					
14	41.5	2	8	5.5	9	2	2	2	4	6	1					
15	53.5	4	8	5.5	9	2	2	8	12	2	1					
16	40.5	4	4	6.5	9	2	4	2	6	1	2					
17	37	4	4	5	9	2	2	2	6	2	1					
18	37.5	2	4	5.5	9	2	2	2	4	6	1					
19	46	4	4	5	6	2	2	8	8	6	1					
20	40	4	3	6	9	2	6	2	2	4	2					
21	68	2	12	6	9	2	4	12	12	6	3					
22	56	4	8	6	9	2	6	2	12	6	1					
23	64.5	4	12	6.5	9	4	8	8	9	2	2					
24	43.5	4	8	5.5	9	2	2	2	3	4	4					
25	66.5	8	12	5.5	9	2	6	4	12	2	6					
26	61	8	12	6	9	4	2	4	8	2	6					
27	48.5	4	12	5.5	9	2	4	2	4	2	4					
28	43.5	4	12	5.5	9	2	2	2	2	1	4					
29	60.5	4	12	5.5	9	2	8	4	12	2	2					

Figure 2.1 : Tableau de données traité par Stat Box®.

Remarques :

- Éviter, sur la ligne des libellés, que deux variables aient le même nom. Seule la première sera prise en compte.
- Si vous désirez changer de données, vous pouvez changer de feuille ou effectuer des modifications sur la feuille en cours et relancer Stat Box.

2.3.3.2. Lancement de Stat Box

Après avoir ouvert le tableau de données, on lance Stat Box® après avoir sélectionné la méthode ACP (figure 2.2).

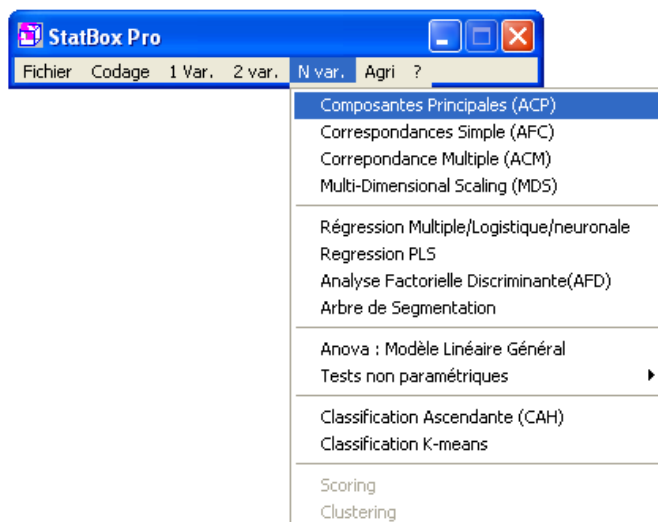


Figure 2.2 : Sélection de la méthode ACP.

Selon les méthodes, tous les types de variables ne seront pas disponibles. En sélection manuelle, il appartiendra à l'utilisateur de contrôler que la sélection de données contenant le type de données attendu pour la méthode en cours.

Chaque variable sera identifiée dans les boîtes de dialogue par son nom précédé d'un code indiquant son type :

- T pour les variables comportant du texte
- N pour les variables numériques
- S pour les variables codées

Comme l'ACP traite des variables quantitatives, l'indice N pour chaque variable (figure 2.3).

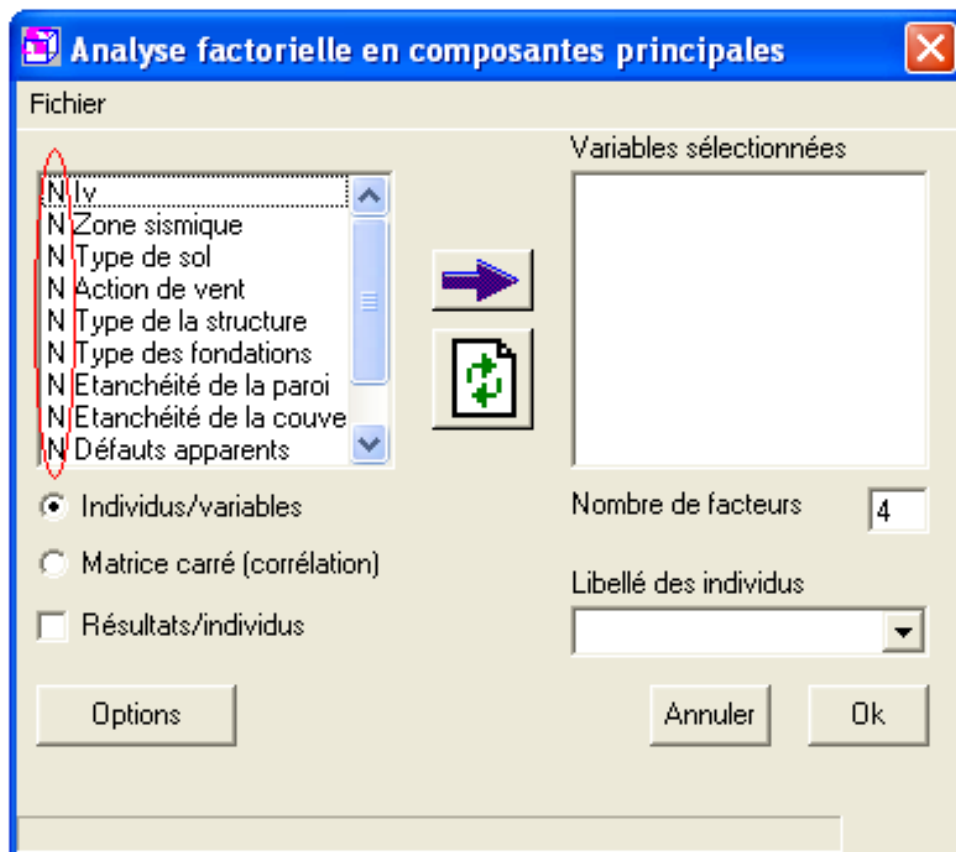


Figure 2.3 : Visualisation de l'indice N pour les valeurs quantitatives.

2.3.4. Mise en œuvre

2.3.4. 1. Affichage de données

Sélectionnez l'ensemble des variables à contrôler en les plaçant dans la liste de droite (figure 2.4).

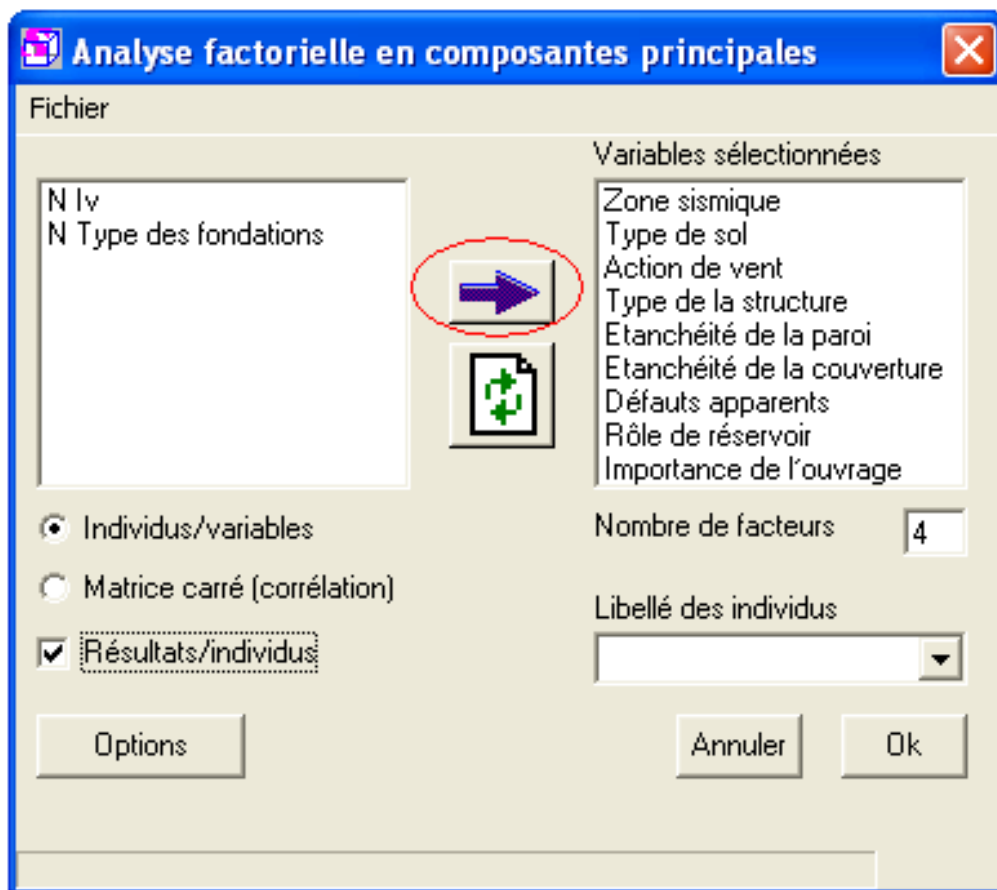


Figure 2.4 : Interface de données.

Individus/variables : Coché cette option pour préciser que nos données sont sous la forme d'un tableau de n individus en lignes et de p variables en colonnes.

Résultats/individus : Cochez cette option pour obtenir les résultats et les graphes sur les individus.

Nombre de facteurs : Choisir le nombre de facteur (axes principaux) que l'on veut avoir, par défaut Stat Box[®] choisit 4.

Libellé des individus : chaque individu est représenté par des codes 1, 2, 3,... A chaque modalité 1, 2, 3,... correspond un libellé (figure 2.5, 2.6).

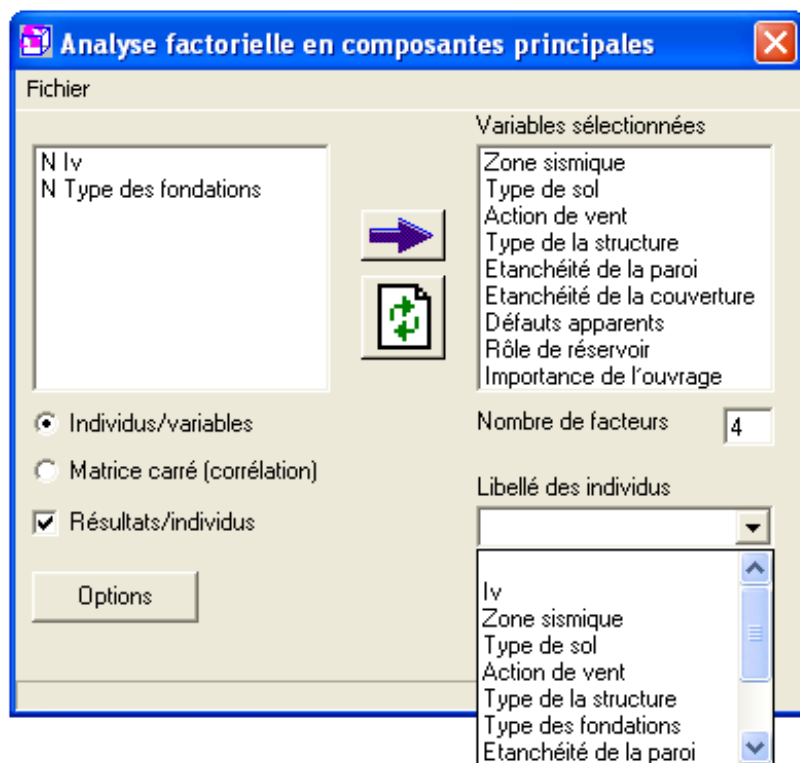


Figure 2.5 : interface de données.

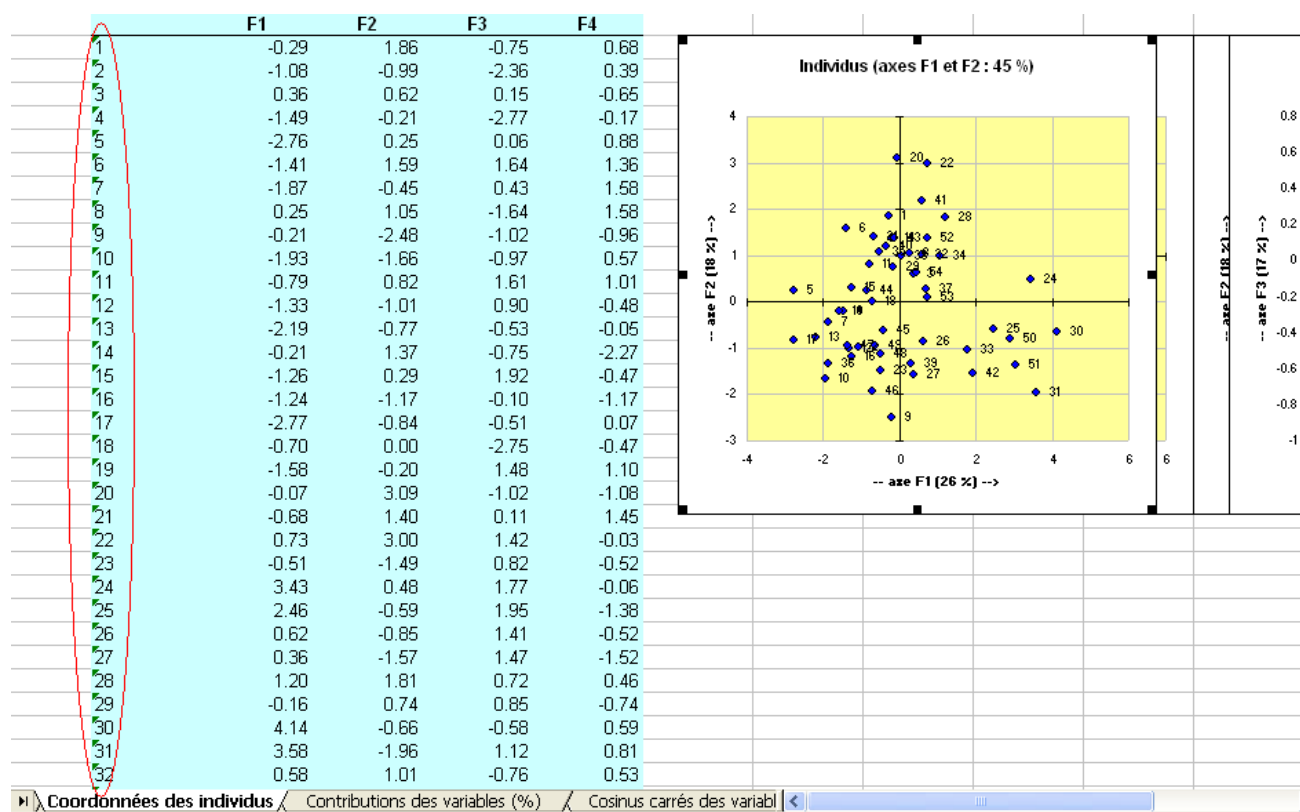


Figure 2.6 : Représentations des individus par des codes dans le fichier résultats.

2.3.4. 2. Options

Cette interface, présent dans presque toutes les méthodes, propose les options statistiques ou de calculs pour la méthode en cours.

Pour accéder aux options du logiciel, cliquez sur « Options », la boîte suivante apparaît (figure 2.7) :

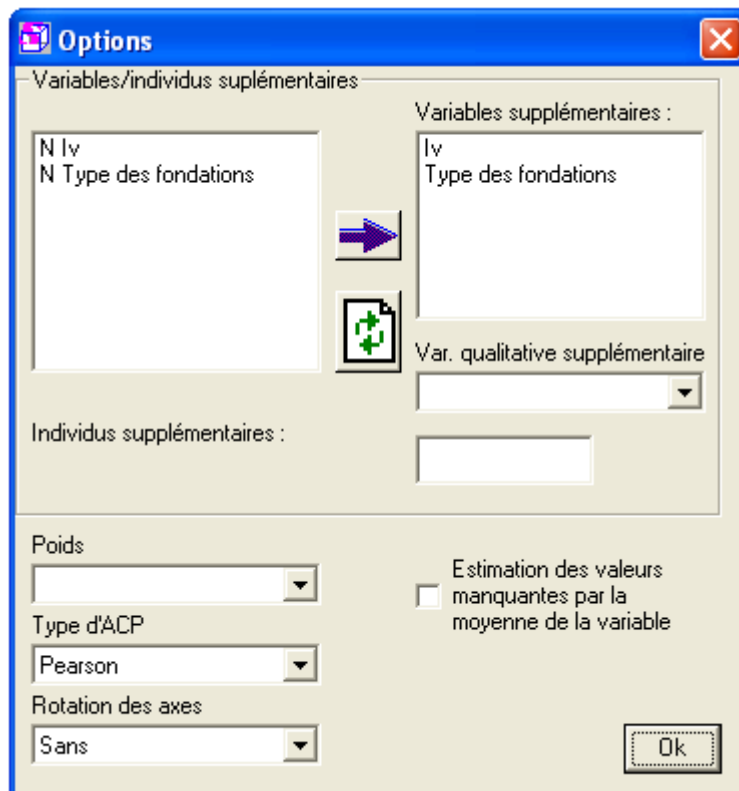


Figure 2.7 : Interface options.

Variables supplémentaires : Sélectionnez l'ensemble des variables supplémentaires en les plaçant dans la liste de droite.

Variables qualitative supplémentaires : dans notre cas nous n'avons pas de variables qualitatives supplémentaires.

Individus supplémentaire : il n'y a pas nécessairement d'individus supplémentaires

Estimation des valeurs manquantes par la moyenne de la variables : s'il n'y a pas de valeurs manquantes, il n'y a pas lieu de cocher cette case.

Poids : Cochez cette case si vous désirez pondérer les données, puis sélectionnez la variable de pondération. Les valeurs manquantes dans les poids sont cumulées avec les valeurs manquantes dans les données.

Type d'ACP : afin de permettre a Stat Box[®] d'afficher la matrice de corrélation dans le fichier résultats, il ya lieu de choisir la matrice de corrélation de Pearson dans la case « type d'ACP ».

Rotation des axes : Sélectionner sans rotations des axes.

➤ Option des mappings

Une fois coché les options choisis, on appuis sur OK. Une fenêtre des options des graphes vas apparaitre (figure 2.8).

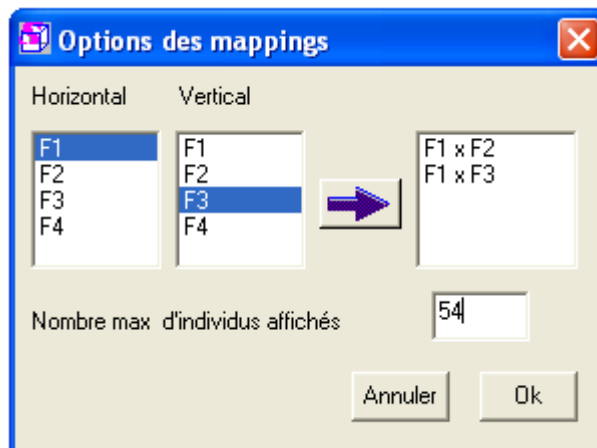


Figure 2.7 : Onglet option des graphes.

Cette option permet de choisir les nombres de plan d'axes affichés dans le fichier résultats. Pour notre cas, nous avons choisis les plans (F1.F2), (F1.F3) ; le plan (F2.F3) nous donnera les mêmes informations que les deux plans choisis.

Nombre d'individus max affichés : par défaut Stat Box choisit 100. Dans notre cas, le nombre d'individus (réservoirs) expertisés est de 54.

2.4. Performances

2.4.1. Temps de calcul

Les calculs sont généralement assez rapides, sauf dans le cas des modules faisant appel à des méthodes itératives d'optimisation ou à la programmation dynamique (algorithme de Fisher) où les temps de calcul peuvent être élevés, selon le paramétrage utilisé et/ou la taille des jeux de données.

2.4.2. Temps d'affichage

L'affichage des tableaux de résultats dans une feuille Excel[®] est assez rapide pour un petit nombre d'individus, plus le nombre d'individus augmente plus l'affichage sera long. Aussi, lorsqu'il y a lieu de traiter de grands jeux de données, il faut prendre garde aux options qui sont proposées dans les boîtes de dialogue au sujet de l'affichage de certains résultats, par exemple :

- la matrice de corrélation dans l'analyse en composantes principales (ACP),
- les matrices d'inertie dans l'analyse factorielle discriminante (AFD),

- la matrice de proximité dans la classification ascendante hiérarchique (CAH).

L’affichage des graphiques se fait en même temps que l’affichage des tableaux de résultats. Cependant, il est nécessaire de faire attention aux options proposées lors de l’affichage. En dehors des problèmes de lisibilité des graphiques, évitez par exemple de représenter 500 observations dans une ACP, car le temps d’affichage sera excessivement long.