

Application de l'analyse statistique multivariée pour la compréhension de la chimie des eaux souterraines dans le bassin de l'Ouergha, Maroc

Mohamed SADIKI* et Souad MRABET

*Laboratoire des Géosciences Appliquées, Département de Géologie, Université Ibn Tofail
BP 242, 14000 Kenitra, Maroc*

* Correspondance, courriel : sadiki_m@univ-ibntofail.ac.ma

Résumé

Le bassin de l'Ouergha reçoit parmi les précipitations les plus élevées du Maroc. Cependant, la région souffre du manque d'eau de bonne qualité. La mesure de la conductivité électrique des eaux affiche des valeurs élevées qui a permis de relier la grande salinité de ces eaux aux roches évaporitiques. Cette étude montre l'importance de l'étude statistique dans la détermination de l'origine de salinité des eaux souterraines. Près d'une centaine d'échantillons ont été prélevés de la zone d'étude et ont fait objet de plusieurs analyses sur terrains et aux laboratoires. L'ACP et la classification hiérarchique ascendante ont été respectivement appliquées sur les analyses des eaux de la région pour déterminer la source de la variation de la salinité des eaux et également pour les classer selon leurs faciès. L'étude hydrochimique révèle que les eaux sont classées selon trois faciès: Carbonaté calcique, chloruré et sulfaté calcique et chloruré et sulfaté sodique. L'analyse statistique appliquée a conduit à la confirmation des résultats développés à partir de l'étude hydrochimique précédente. Différents facteurs ont été soulevés expliquant les principaux processus hydrochimiques dans l'aquifère. Ces facteurs révèlent que la salinité des eaux étudiées est liée au processus de dissolution des évaporites associé à un échange de bases et contrôlé par les facteurs climatiques.

Mots-clés : *salinité des eaux, statistique multivariée, analyse en composante principale, classification hiérarchique ascendante, bassin de l'Ouergha.*

Abstract

Multivariate statistical analysis for understanding groundwater chemistry of the l'Ouergha basin Morocco

The goal is to characterize the salinity of groundwater in the l'Ouergha basin. The high salinization of groundwater in the study area has been attributed to salt rocks because of the high and increasing of electric conductivity value distribution. This study demonstrates the strength hierarchical cluster and principal component analysis (PCA) in determining sources of groundwater salinity in l'Ouergha basin. Nearly one hundred groundwater samples were taken from hydrogeological terrains and analyzed for the concentrations of the major ions (K, Na, Ca, Mg, Cl, HCO₃ and SO₄), total dissolved solids (TDS), electrical conductivity (CE), temperature (T°C) and pH after standard procedures. Hierarchical cluster analysis and factor analysis were respectively used to spatially classify groundwater samples and determine the probable sources of variation

in groundwater salinity. Based on the hydrochemistry, the groundwater was classified into three types : Ca-HCO_3 , $\text{Cl-SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$. The groundwater showed path of hydrochemical evolution from Ca-HCO_3 type to $\text{Cl-SO}_4\text{-Na}$ type. The application of Multivariate Statistics Techniques based on Principal component Analysis and Hierarchical Cluster Analysis has led to the corroboration of the hypotheses developed from the previous hydrochemical study. Different factors were found that explained major hydrochemical processes in the aquifer. These factors reveal the existence of dissolution processes of evaporites associated with cations exchange and controlled by the climatic factors.

Keywords : *groundwater salinity, multivariate statistical analysis, hierarchical cluster, principal component analysis (PCA), l'Ouergha basin.*

1. Introduction

La composition chimique des eaux souterraines est fonction de plusieurs facteurs notamment la nature géologique des formations à travers lesquelles l'eau a circulé et a séjourné, elle dépend aussi des variations saisonnières du climat et des éventuelles actions anthropiques. La région du bassin de l'Ouergha est considérée comme une région à grandes ressources en eau au Maroc, du fait de l'importance de la quantité des précipitations qu'elle reçoit, environ 1000 mm/an [1]. Mais ses eaux souterraines sont jugées de qualité impropre à la consommation. En effet la population locale souffre du problème de la salinité des eaux et de son effet néfaste sur la santé, l'agriculture et l'élevage. Le bassin de l'Ouergha est situé sur des terrains de lithologie et de géomorphologie variée. Du point de vue hydrogéologique, le caractère commun à toute cette zone est l'absence de nappe aquifère étendue bien qu'il s'avère que les points d'eau y soient nombreux du fait de l'existence de plusieurs poches d'eau, assez souvent salés. Dans le but de caractériser la qualité physico-chimique de ces eaux, nous avons effectué un échantillonnage à travers toutes les sources d'eaux souterraines et superficielles représentatives de la région d'étude (sources, puits et rivière) afin de déterminer les facteurs responsables de leur dégradation. L'échantillonnage a été pratiqué pendant la période estivale là où la demande en eau est la plus exigeante.

2. Présentation de la zone d'étude

La région étudiée est située au nord-ouest du Maroc et délimitée par les latitudes 34.4 et 34.7 vers le nord, et par les longitudes 5.1 et 5.8 vers l'ouest. Le secteur d'étude est compris entre la région de Mjaâra où est édifié le barrage Al Wahda et la région de Khenichet près de la confluence Sebou-Ouergha (*Figure 1A*).

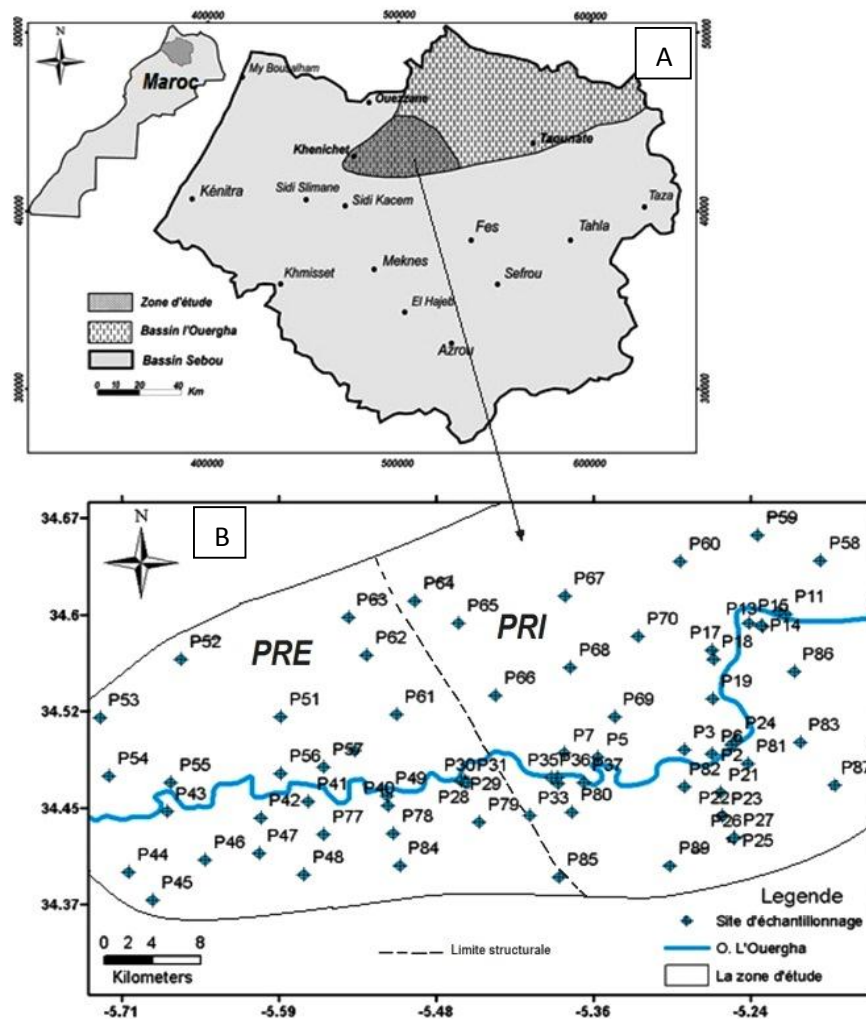


Figure 1 : A : Situation de la zone d'étude dans le bassin hydrologique du Sebou ; B : Situation géographique de la région d'étude et sites d'échantillonnage

De point de vue géologique, la zone d'étude est située dans la zone externe de la chaîne rifaine, comblée par d'épaisses séries mésozoïques et cénozoïques [2]. Les formes topographiques de cette zone, à substratum notamment marneux, montrent une morphologie nettement pénéplanée par comparaison aux autres zones à formations généralement compétentes (calcaires, grès schisteux, etc.). La totalité des points d'eaux étudiés sont situés dans la zone structurale du pré-rif (**Figure 1B**) dont la lithologie comporte essentiellement des faciès marneux. Dans le Pré-rif interne, des terrains jurassiques sont conservés tandis que le Pré-rif externe ne montre qu'un olistostrome (complexe pré-rifain ou nappe pré-rifaine) réalisant le comblement au Miocène moyen et supérieur de l'avant fosse rifaine. Le bassin versant de l'Ouergha est un sous bassin du grand bassin de Sebou, il s'étend sur environ 7300 km² de superficie. La rivière l'Ouergha qui coule de l'est vers l'ouest est redoutable par sa violence et l'importance de ses crues qui provoquent des inondations catastrophiques à l'aval, dans la plaine du Gharb. Les niveaux géologiques susceptibles de former des aquifères de quelques importances sont peu nombreux dans le Pré-rif [1]. Ce sont les calcaires et les dolomies du Lias, la série marno-gréseuse post-Eocène de la nappe d'Ouezzane, les grès et les sables du Tortonien inférieur et du Miocène supérieur-Pliocène, les sédiments caillouteux du Plio-Villafranchien et le Quaternaire graveleux des fonds des oueds et des terrasses.

3. Matériel et méthodes

Une investigation préliminaire a été menée dans toute la région, de par l'accessibilité des sites et des paramètres organoleptiques des eaux : quatre-vingt-dix cibles d'échantillonnage ont été sélectionnées pour l'analyse des eaux souterraines et de surface (**Figure 1B**). Les échantillons sont prélevés dans des flacons stérilisés d'un litre et conduits du site de prélèvements au laboratoire, dans des conditions optimales de conservation, pour diverses analyses chimiques. La température, le pH, la conductivité électrique CE, les matières solides dissoutes totales (TDS) sont mesurés in situ à l'aide d'un appareil multi fonctions de marque Consort C5020. Au laboratoire, les paramètres analysés sont les ions majeurs: le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{++}), les bicarbonates ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les chlorures (Cl^-) et l'ion sulfate (SO_4^{2-}). Les dosages chimiques de ces ions majeurs des eaux naturelles ont été réalisés comme suit : Pour les cations, Ca^{2+} , Mg^{2+} par titrage à l'aide du complexe : EDTA. Na^+ et K^+ par photométrie de flamme. Pour les anions, Cl^- par précipitation à partir d'une solution de nitrate d'argent (dosage volumétrique). SO_4^{2-} par méthode turbidimétrique en utilisant le spectrophotomètre Hach Lange DR 3800. ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), le titre alcalimétrique complet (TAC) a été dosé par le titrage à l'acide sulfurique 0,04 N. Dans le cadre de cette étude, le traitement statistique des données est fait par le logiciel SPSS et le logiciel Excel de Microsoft.

4. Résultats et discussion

Avant l'utilisation des données hydrochimiques, les résultats ont été vérifiés par la méthode dite : « la balance ionique ». Dans notre étude, nous avons supporté un écart de 10 % entre la somme des anions et la somme des cations. Au-delà de cet écart, les analyses ont été écartées et ne figurent pas dans les tableaux des analyses.

4-1. Présentation globale des échantillons étudiés

Au total, environ 1000 analyses physico-chimiques d'eaux ont pu être réalisées. Ces échantillons proviennent des 100 points d'eau déjà mentionnés. La caractérisation physico-chimique est portée aussi bien sur les eaux de puits que sur les eaux de source. De l'étude de la contribution de la cartographie à la caractérisation des eaux souterraines de l'Ouergha [3], nous avons constaté qu'il y a une corrélation entre l'évolution de la qualité des eaux souterraines et la nature lithologique des aquifères de l'amont vers l'aval du bassin. C'est ainsi que les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés séparément selon l'origine structurale des prélèvements. Il existe deux populations d'eau. Une population prélevée des aquifères appartenant au préif interne (PRI) et une population prélevée à partir des aquifères appartenant au préif externe (PRE). Le **Tableau 1** récapitule les résultats d'analyse des paramètres de la qualité des eaux souterraines du bassin de l'Ouergha.

Tableau 1 : Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines dans le bassin de l'Ouergha

	PRI			PRE		
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.
pH	6,93	8,28	7,37	7,15	8,51	7,60
T °C	18	26	19,7	18	20	19,1
Conductivité (µS/cm)	450	8690	1942,54	1360	9050	3485,08
TDS (mg/L)	200	5300	1066,30	750	5560	2089,46
Ca ⁺⁺ (mg/L)	156	620	346,36	200	776,00	398,17
Mg ⁺⁺ (mg/L)	17	76	41,92	18	110,00	58,29
Na ⁺ (mg/L)	19,5	1823,5	321,96	194,2	2020,50	819,23
K ⁺ (mg/L)	1,93	11,4	4,2626	2,1	12,6	6,8
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	126,2	403	261,94	79,8	291,4	167,43
Cl ⁻ (mg/L)	36,92	2107,5	400,25	290,5	2266	961
SO ₄ ⁻ (mg/L)	20,5	192,6	53,72	40,5	304,96	154,96

Une présentation synthétique des résultats d'analyses est donnée par la **Figure 2**. Il s'agit de courbes cumulatives qui montrent la distribution des fréquences des principales espèces ioniques et de la charge totale dissoute TDS des eaux étudiées. Les plages de variation des concentrations sont ainsi clairement visibles. Elles s'étalent comme suit :

- De 2 mg/L à 10 mg/L pour la concentration des eaux de la région en potassium. Plus de 50 % des valeurs sont supérieures à 5 mg/L. Pour le magnésium, les valeurs sont un peu plus élevées par rapport à celles du potassium. Les valeurs de la concentration du magnésium varient entre 11 mg/L et 100 mg/L dont plus de 50 % des mesures ont des valeurs supérieures à 40 mg/L,
- Moins de 20 mg/L à plus de 300 mg/L pour les sulfates, 50 % des mesures ont montré des valeurs inférieures à 50 mg/L,
- Selon les diagrammes de fréquence cumulée, les bicarbonates et le calcium ont montré une même évolution avec une légère différence de concentration entre les deux éléments qui est lié à une origine différente. Pour les bicarbonates, les valeurs de mesures varient entre 80 mg/L à 300 mg/L dont 50 % des mesures ont montré des valeurs supérieures à 200 mg/L. Quant au calcium, les mesures varient entre moins de 200 mg/ à environ 800 mg/L. La moitié des mesures montrent des valeurs supérieures à 300 mg/L.
- Le sodium et les chlorures montrent également une même évolution quant à l'acquisition de la concentration. Les valeurs présentées dévoilent un grand écart entre le minimum qui est moins de 60 mg/L et le maximum qui atteint plus de 2000 mg/L. 50 % des mesures montrent des valeurs qui dépassent 300 mg/L pour le sodium et 600 mg/L pour les chlorures.
- L'acquisition de la concentration en éléments majeurs va certainement influencer sur la minéralisation totale des eaux étudiées. Sur le diagramme, cette minéralisation est représentée par les TDS dont les mesures ont montré des valeurs élevées qui dépassent les 5000 mg/L. Environ 40 % des analyses montre des valeurs supérieures à 1000 mg/L.

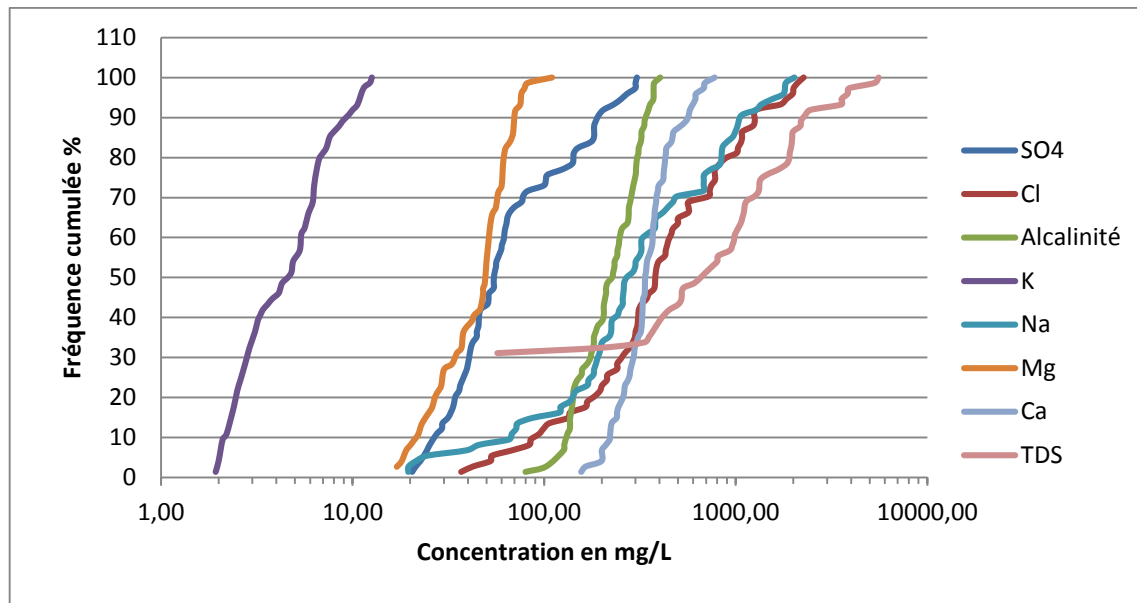


Figure 2 : *Distribution des fréquences cumulées des concentrations en ions majeurs dans les eaux souterraines*

Nous pouvons conclure que plus les eaux sont concentrées plus les chlorures et le sodium deviennent dominants. Environ 60 % des mesures dont la charge dissoute est inférieure à 1000 mg/L ont un faciès bicarbonaté et chloruré calcique et sodique alors que les 40 % restantes dont la concentration globale dépasse 1000 mg/L sont essentiellement chlorurées sodiques. Ce qui explique le caractère salin des eaux dans la région d'étude. Nous constatons ainsi, la diversité des amplitudes de variation de la distribution des éléments majeurs dans les eaux étudiées, qui se traduit dans la forme des courbes et dont l'interprétation pourra servir à confirmer les résultats de l'étude hydrochimique.

4-2. Facies hydrochimique des eaux de l'Ouergha

La projection des résultats des analyses chimiques dans le diagramme de Piper (**Figure 3**) fait apparaître clairement une importante variation de la chimie des eaux souterraines et superficielles. Il résulte de la projection des résultats d'analyse dans le diagramme de Piper trois faciès principaux correspondant à trois familles des eaux [3] :

- Bicarbonatée calcique dans les prélèvements du préif interne,
- Chlorurée et sulfatée calcique dans les prélèvements du préif interne et externe,
- Chlorurée et sulfaté sodique dans les prélèvements du préif interne et externe.

On constate, que les eaux prélevées à partir des aquifères du préif interne se distinguent par plusieurs faciès, avec une prédominance du faciès chloruré et sulfaté calcique, ce qui reflète une multitude d'origines de la minéralisation de ces eaux. Les eaux issues de la région du préif externe sont plus représentées par un faciès chloruré et sulfaté sodique néanmoins certains points, surtout dans les limites entre les deux domaines du préif, présentent un faciès chloruré et sulfaté calcique.

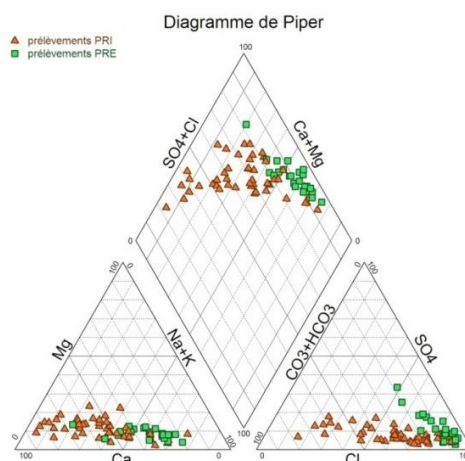


Figure 3 : *Diagramme de Piper des eaux souterraines (PRI préif interne et PRE préif externe)*

4-3. Traitement statistiques des données

Dans le but de déterminer les paramètres pouvant influencer le comportement chimique des eaux nous avons utilisé le programme SPSS dont les méthodes statistiques indispensables pour telle étude sont ; *l'analyse en composantes principales (ACP)* et *la classification hiérarchique ascendante*.

4-3-1. Analyse multivariée

L'intérêt de cette technique est qu'elle permet de résumer à quelques axes factoriels le maximum d'informations contenues dans les tableaux lourds de données. La projection des individus sur un plan factoriel offre l'avantage d'appréhender la similitude ou l'opposition entre les caractéristiques des individus et les sources de leur variabilité [4]. L'ACP permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre différentes eaux et entre divers pôles d'acquisition de la minéralisation [5]. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit. Elle permet également d'abaisser le nombre de variables et de détecter une structure dans les relations entre variables, c'est-à-dire, les ordonner. La réduction des données à l'aide d'une analyse factorielle se base sur la logique de rotation des axes [6].

4-3-1-1. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation permet de déceler les liens existants entre les différentes variables, positifs ou négatifs. Elle regroupe les corrélations de plusieurs variables entre elles et extrait les coefficients indiquant l'influence que les variables ont les unes sur les autres. L'examen des (**Tableaux 2 et 3**) relatifs à la matrice de corrélation permet de constater que certains paramètres sont toujours corrélés entre eux dans toutes les analyses effectuées. Alors que certains d'autres sont corrélés dans une analyse et ne le sont pas dans une autre. La majorité des corrélations des paramètres des eaux souterraines sont positives. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et les chlorures, le sodium et les sulfates d'autre part. La même importance de corrélation est remarquée entre ces paramètres et le TDS. Dans les deux cas, la corrélation est positive et permet de déduire les éléments majeurs responsables de l'augmentation de la minéralisation et de la salinité dans les eaux étudiées.

Tableau 2 : Matrice de corrélation entre les variables des souterraines du préif interne

PRI	T°C	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
T°C	1,000										
pH	0,350	1,000									
CE	-0,019	0,125	1,000								
TDS	-0,042	0,077	0,969	1,000							
Ca	0,157	0,174	0,605	0,532	1,000						
Mg	-0,212	0,188	0,251	0,220	0,302	1,000					
Na	-0,009	0,190	0,937	0,905	0,515	0,193	1,000				
K	0,139	0,065	0,566	0,536	0,320	0,140	0,535	1,000			
HCO3	0,156	0,067	0,195	0,188	0,657	0,368	0,148	0,001	1,000		
Cl	0,002	0,193	0,955	0,909	0,594	0,221	0,983	0,575	0,118	1,000	
SO4	-0,064	0,259	0,630	0,605	0,482	0,109	0,784	0,222	0,282	0,724	1,000

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables des souterraines du préif externe

PRE	T°C	pH	CE	TDS	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
T°C	1,000										
pH	-0,146	1,000									
CE	0,078	-0,326	1,000								
TDS	0,059	-0,337	0,991	1,000							
Ca	-0,170	-0,191	0,737	0,761	1,000						
Mg	0,045	-0,380	0,541	0,514	0,684	1,000					
Na	0,110	-0,312	0,960	0,946	0,645	0,502	1,000				
K	0,203	-0,096	0,718	0,711	0,317	0,178	0,706	1,000			
HCO3	-0,101	-0,077	0,258	0,239	0,494	0,428	0,200	-0,139	1,000		
Cl	0,091	-0,338	0,963	0,954	0,693	0,525	0,989	0,712	0,157	1,000	
SO4	-0,203	0,026	0,489	0,515	0,784	0,613	0,404	0,109	0,489	0,386	1,000

D'autres corrélations sont moins significatives entre la conductivité électrique d'une part et les bicarbonates permettent de dire que la salinité de l'eau est beaucoup plus due aux formations salifères qu'aux roches carbonatées. La forte liaison qui existe entre les sulfates et le calcium en aval du bassin peut confirmer cette tendance. Les éléments chimiques qui sont bien corrélés, proviennent de la même origine. Alors que ceux qui ne le sont pas, ont une origine multiple. Ceux qui sont en corrélation négative sont les témoins du phénomène d'échange de bases. Celui qui diminue aurait dû être remplacé par celui dont la concentration augmente. En effet les trois tableaux révèlent une bonne corrélation entre les chlorures et le sodium qui prennent leur origine de la dissolution de roches salifères abondantes dans la région (NaCl).

Egalement le même type de liaison regroupe les bicarbonates et le calcium surtout en amont du bassin là où la source de calcium est liée surtout aux roches carbonatées. Les sulfates quant à leur corrélation, sont plus corrélés avec le sodium et les chlorures en amont, en revanche ils deviennent plus corrélés avec le calcium et le magnésium en aval du bassin. La température et le pH sont les seuls paramètres physiques qui ne sont presque pas corrélés avec aucun paramètre.

4-3-1-2. Analyse en composante principale

Afin de déterminer d'éventuelles relations entre les différents éléments majeurs dans les eaux du bassin de l'Ouergha, une analyse en composantes principales a été réalisée avec le coefficient de Pearson.

4-3-1-2-1. Analyse de l'espace des variables

L'ACP réalisée à partir de 11 paramètres pour 74 échantillons montre que trois composantes principales sont mises en évidence (**Figure 4 et Tableau 4**). Les composantes principales 1, 2 et 3 prennent en compte 81 %, de l'inertie globale (la variance) pour les analyses des eaux de surface, 74 % des eaux souterraines du préif interne et 81 % des eaux du préif externe; Le grand pourcentage de l'information contenu dans les résultats d'analyse est expliqué par ces trois composantes (ou plans factoriels). Elles peuvent donc permettre d'interpréter les résultats obtenus.

Tableau 4 : Tableau des valeurs propres

Eaux analysées	Composantes Ou axes factoriels	Valeurs propres	Valeurs propres cumulées	% de variance exprimée	% de variance Exprimée cumulée
PRI	C1	5.309	5.309	48.264	48.264
	C2	1.569	6.878	14.263	62.527
	C3	1.329	8.207	12.082	74.609
PRE	C1	5.885	5.885	53.496	53.496
	C2	1.915	7.800	17.405	70.901
	C3	1.130	8.930	10.275	81.176

Pour les eaux souterraines étudiées, le grand axe est exprimé par le premier axe C1 ; 48.264 % et 53.496 % de la variance est exprimé par cet axe pour les eaux souterraines du préif interne et externe respectivement. Il est déterminé, par ordre de grandeur décroissant, par (**Tableau 5 et Tableau 6**):

- Les chlorures, la conductivité, le sodium, le TDS, les sulfates et le calcium pour les eaux du PRI.
- La conductivité, les TDS, les chlorures, le sodium, le calcium, le magnésium et les sulfates pour les eaux du PRE.

Les axes C2 et C3 quant à eux, ne renferment qu'une information minime par rapport à l'axe C1. Ils expriment respectivement 14.263 % et 12.082 % de la variance pour les eaux du PRI et 17.405 % et 10.275 % de la variance pour les eaux du PRE. Et ils ne sont donc représentés que par les bicarbonates et dans un cas par les sulfates ou le magnésium. La majorité des éléments responsables de la minéralisation sont représentés par le plan C1-C2. Puisqu'il exprime le grand pourcentage de la variance, ce plan oppose donc les eaux minéralisées aux eaux faiblement chargées.

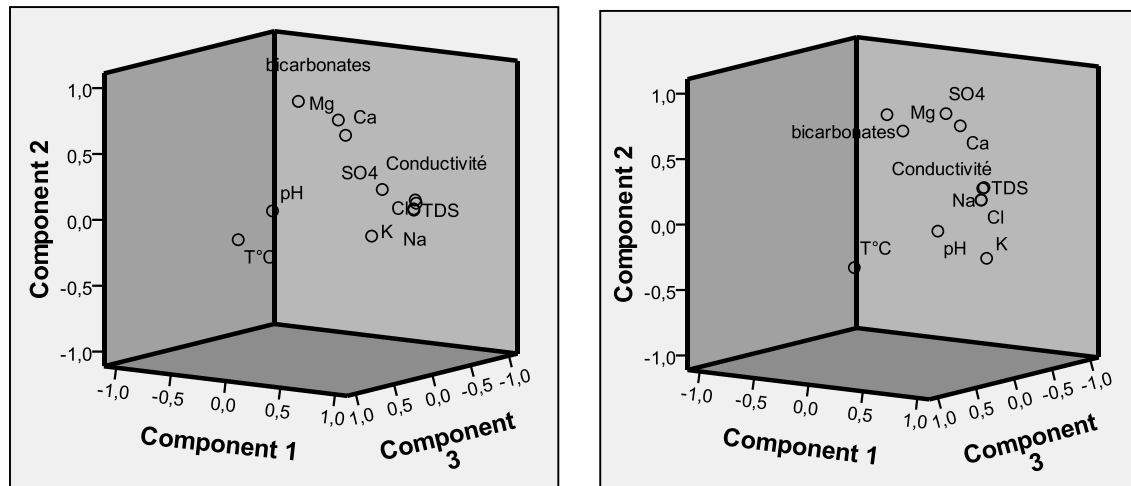


Figure 4 : Espace des variables de l'ACP globale des eaux souterraines du préfif interne (à gauche) et du préfif externe (à droite)

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les variables et les composantes principales (PRI)

Eaux de PRI	Composante		
	1	2	3
Cl	0,965	-0,191	0,063
Conductivité	0,958	-0,167	-0,014
Na	0,955	-0,204	0,059
TDS	0,922	-0,208	-0,036
SO4	0,758	0,010	-0,007
Ca	0,708	0,493	-0,109
K	0,595	-0,213	0,224
HCO3	0,333	0,780	-0,306
T°C	0,034	0,433	0,790
Mg	0,320	0,397	-0,521
pH	0,235	0,423	0,518

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les variables et les composantes principales (PRE)

Eaux de PRE	Component		
	1	2	3
Conductivité	0,970	-0,165	0,073
TDS	0,968	-0,154	0,089
Cl	0,944	-0,250	0,063
Na	0,934	-0,245	0,068
Ca	0,841	0,410	0,074
Mg	0,686	0,373	-0,368
K	0,648	-0,574	0,281
SO4	0,619	0,617	0,152
HCO3	0,361	0,672	-0,206
pH	-0,359	0,152	0,747
T°C	0,047	-0,499	-0,515

4-3-1-2-2. Analyse de l'espace des individus

Dans cette partie nous allons analyser la disposition des individus d'après leurs projections sur les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 comme la représente la **Figure 5**. La projection des individus sur le plan F1-F2 (**Figure 5a et Figure 5c**) montre une compétition, selon l'axe F1, entre les eaux chlorurées et sulfatées sodique du côté positif de l'axe, et les eaux bicarbonatées calciques du côté négatif. Cette compétition reflète normalement l'hétérogénéité entre les échantillons issus de l'amont et ceux issus de l'aval du bassin. Les eaux en provenance des aquifères carbonatés calcaires et marneux sont plutôt des eaux de faible salinité tandis que les eaux en provenance de aquifères contenant des roches évaporitiques salifères ou gypsifères sont plus salines. Cette salinité est remarquable dans les échantillons en allant de l'amont vers l'aval du bassin, ce qui confirme l'hypothèse d'une contamination des eaux par le phénomène de dissolution contrôlée par la variation lithologique due au changement des domaines géologiques.

L'axe F2 plutôt classe les échantillons selon leur degré d'enrichissement en bicarbonates et en calcium. En effet, les eaux occupant la partie positive de cet axe proviennent de la zone est du préif interne. En revanche, les eaux qui occupent la partie négative de l'axe, sont les eaux qui commencent à s'enrichir en sels en passant par des aquifères riches en matière des évaporites. On assiste ainsi au phénomène d'échange de base caractérisé par une libération du sodium et captage du calcium. Ce phénomène est connu dans la partie ouest du préif interne et toute la région du préif externe. Pour les eaux du préif interne, l'axe F3 ne montre pas vraiment une influence lié à la minéralisation (**Figure 5b et 5d**), du ce fait on assiste à la même disposition des échantillons par rapport à l'axe F2. Par contre pour les eaux du préif externe cet axe est discriminatif entre deux populations ; une population riche en magnésium dans la partie positive de l'axe et c'est la plus abondante et une population représentée par quelques échantillons (05 échantillons) dans la partie négative de l'axe.

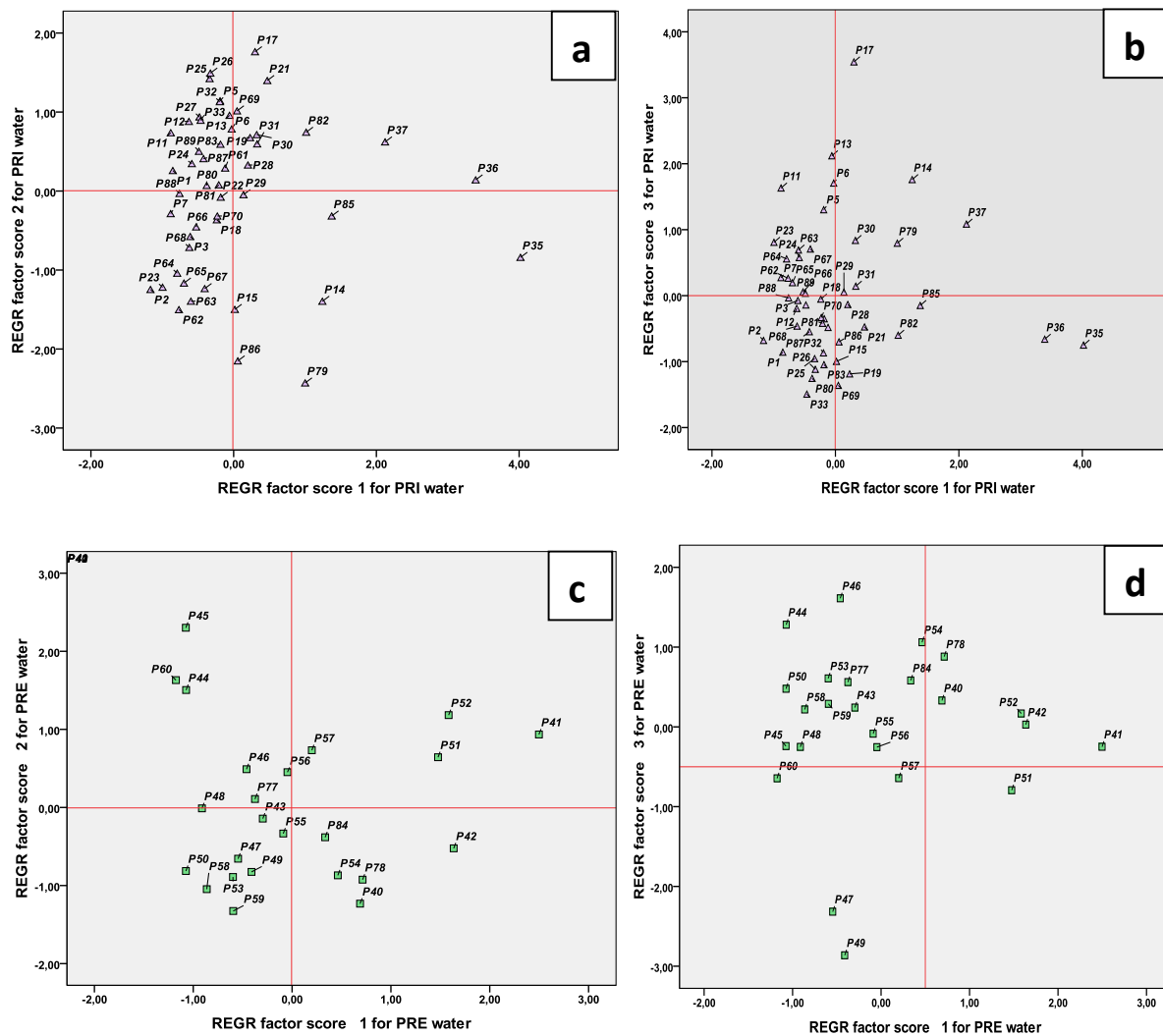


Figure 5 : Analyse de l'espace des individus sur le plan factoriel F1-F2 (à gauche) et le plan factoriel F1-F3 (à droite)

4-3-2. Classification hiérarchique ascendante

La classification hiérarchique est utilisée pour déterminer si les échantillons pourraient être regroupés statistiquement en différents groupes hydrochimiques. Ce regroupement pourrait avoir une signification dans le contexte géologique. Un certain nombre d'études ont utilisé cette technique pour réussir à établir une classification des échantillons d'eau [7-10]. Des comparaisons fondées sur plusieurs paramètres à partir de différents échantillons ont été faites et les échantillons ont été regroupés en fonction de leur similitude les uns par rapport aux autres. Le schéma (dendrogramme) de classification à l'aide de la méthode de distance euclidienne montre des groupes distinctifs où chaque membre du groupe est plus semblable à ses collègues qu'à tout membre de l'extérieur du groupe [11]. Les dix variables hydrochimiques mesurées ont été utilisés dans cette analyse (**Figure 6**). La classification hiérarchique ascendante réalisée avec des variables normalisées (centrées réduites), montre un classement en un seul grand groupe (cluster) pour les eaux souterraines. Il convient de remarquer que les éléments responsables de la salinité sont les chlorures et le sodium en premier degré suivi par les sulfates. Ces éléments ont tous été regroupés dans le même cluster pour toutes les eaux étudiées. Ce cluster regroupe essentiellement les éléments les plus solubles, traduisant les éléments caractéristiques des eaux salées.

Le groupe et les sous-groupes des eaux caractérisés par une affiliation entre le calcium et les bicarbonates représentent les eaux de faible minéralisation (Eaux de moyenne qualité). Contrairement au diagramme de Piper qui montre trois faciès, la classification hiérarchique ascendante permet de présenter la grande hétérogénéité à l'intérieur des faciès dominants. Cette observation met en évidence que le chimisme des eaux dépend, en plus du sens de l'écoulement, de la zone dans laquelle l'échantillon a été prélevé mais aussi de sa proximité d'un cours d'eau (éventuelle zone de recharge).

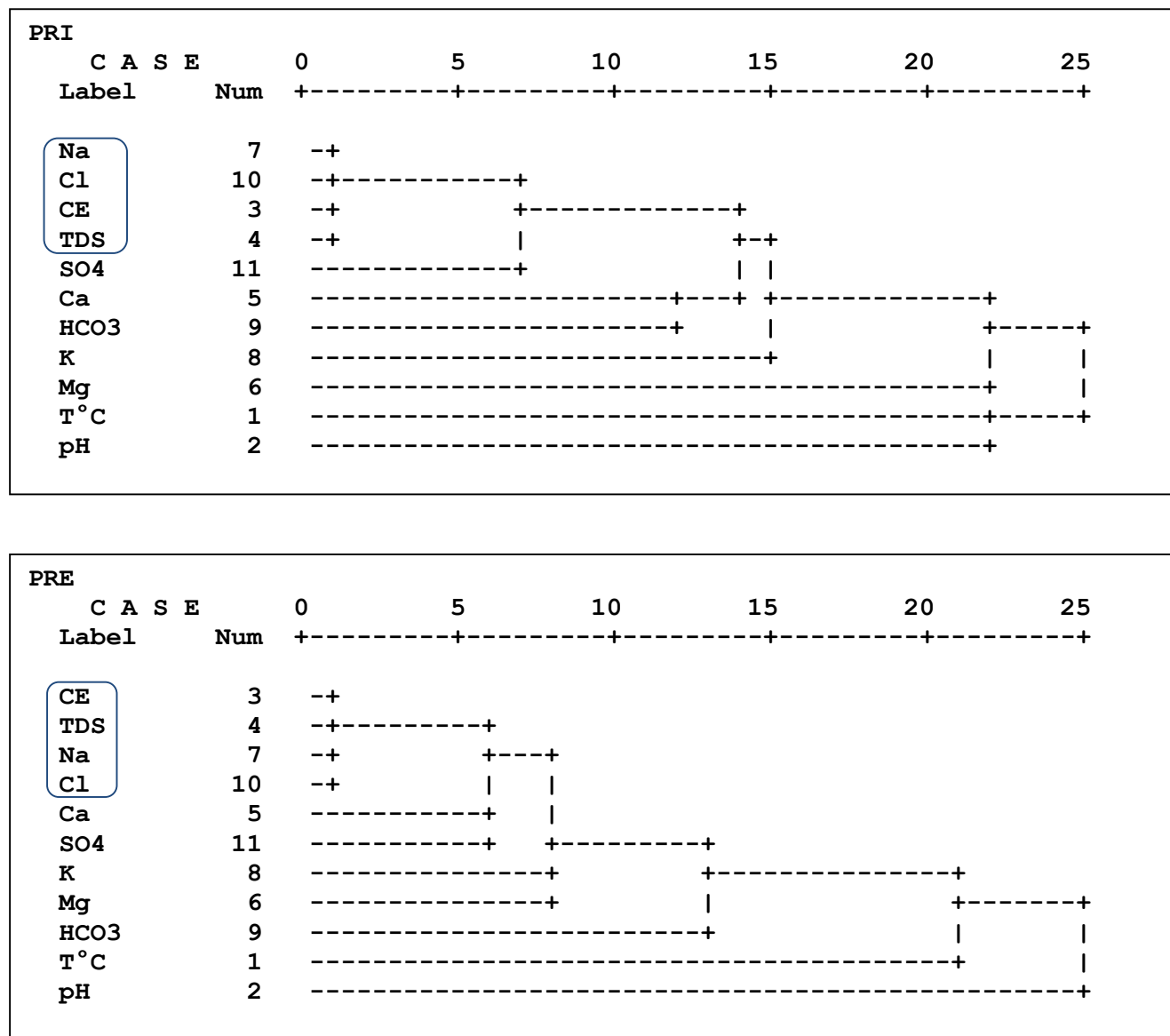


Figure 6 : Classification hiérarchique ascendante des eaux étudiées

5. Conclusion

L'étude de l'évolution du chimisme des eaux du système aquifère par l'analyse statistique nous éclaire quant à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région de l'Overgha. Au-delà de la confirmation qu'elle donne sur l'évolution des faciès des eaux évoquée dans le diagramme de Piper, cette étude a permis d'avoir une distribution plus précise des différents faciès chimiques des eaux que le diagramme de Piper. Tandis que l'utilisation des ions majeurs dans l'ACP a montré l'affinité existant entre les différents éléments

chimiques des eaux. L'étude confirme la présence des eaux qui sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de trois importants faciès chimiques, qui sont de l'amont vers l'aval ; le bicarbonaté calcique, le chloruré et sulfaté calcique et le chloruré et sulfaté sodique. L'analyse en composante principale montre que les eaux de la zone d'étude ont subi une nette évolution d'amont en aval ; les points d'eau qui se situent en amont de la nappe se trouvent faiblement minéralisés au contraire de ceux qui se positionnent en aval le sont fortement. L'étude de l'ACP et de la classification hiérarchique ascendante de l'évolution des éléments chimiques majeurs des eaux, a montré la dominance des ions évaporitiques de type salifères (Na^+ , Cl^-) et gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport aux ions carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité. Cette étude a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe et les argiles des aquifères par l'augmentation des teneurs en Na^+ par rapport à Cl^- . La salinité des eaux de l'Ouergha est donc contrôlée par la nature lithologique des roches des aquifères de la région d'étude. Dans la partie amont du bassin, ce contrôle est principalement assuré par les formations carbonatées qui sont, vers l'aval, relayées par les formations évaporitiques. A ce contrôle lithologique peut s'ajouter celui opéré par l'aridité du climat et le fonctionnement du barrage Al Wahda sur les variations spatiales et temporelles de la composition chimique des eaux du bassin de l'Ouergha.

Références

- [1] - J. P. THAUVIN, Ressources en eau du Maroc tome 1. Domaines du rif et du Maroc oriental, éditions du service géologique du Maroc rabat (1971) 31 - 32.
- [2] - A. PIQUEE, A. SOULAIMANI, CH. HOEPFFNER, M. BOUABDELLI, E. LAVILLE, M. AMRHAR et A. CHALOUAN, géologie du Maroc, édition géode, collection terre et patrimoine, série manuels 287 pages. Le rif externe (2007) 188p.
- [3] - M. SADIKI et S. MRABET, Apport de la spatialisation des données a la caractérisation physico-chimique des ressources en eau. Cas du bassin de l'Ouergha, Maroc. Arabian journal of earth sciences, Vol.4, issue 1 (2015) 1-23 ou Vol.4, N°1 (2015) 1-23.
- [4] - M. CANCEILL et A. LANDREAU, Analyse statistique multidimensionnelle : proposition méthodologique pour l'analyse de données concernant la chimie des eaux souterraines. Rapport BRGM (1978), 78 SGN 001 hyd. 36 p.
- [5] - Y. M. S. OGA, Ressources des eaux souterraines dans la région du grand Abidjan (Côte d'ivoire) : approches hydrochimique et isotopique (1998), (Thèse de doctorat).
- [6] - A. DEBBAKH, Qualité et dynamique des eaux des systèmes lacustres en amont de l'oued righ (2012), (Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah de Ouargla).
- [7] - G. A. A. ALTHER, Simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: a case history (1979), Groundwater, 17(6), 556-561.
- [8] - I. M. FARNHAM, K. J. STETZENBACH, A. K. SINGH, K. H. JOHANNESSON, Deciphering groundwaterflow systems in Oasis Valley, Nevada, using trace element chemistry, multivariate statistics, and Geographical Information System (2000), Mathematical Geology 32, 943-968.
- [9] - W. D. ALBERTO, D. M. DEL PILAR, A. M. VALERIA, P. S. FABIANA, H. A. CECILIA, B. M. DE LOS ANGELES, Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study : Suquia River Basin (Cordoba-Argentina) (2001), Water Research 35, 2881-2894.
- [10] - S. X. MENG & J. B. MAYNARD, Use of statistical analysis to formulate conceptual models of geochemical behavior : water chemical data from the botucatu aquifer in Sao Paulo state, Brazil (2001), Journal of Hydrology, 250(1), 78-97.
- [11] - C. GÜLER, G. D. THYNE, J. E. MCCRAY & K. A. TURNER, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data (2002), Hydrogeology journal, 10(4), 455-474.