

## **Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga, Extrême-Nord Cameroun**

**Emmanuel AGUIZA ABAI<sup>1\*</sup>, François NTEP<sup>2</sup>, Prosper SAMBA KOUKOUARE<sup>3</sup>,  
Philemon ZE BILO'O<sup>4</sup>, Auguste OMBOLO<sup>5</sup> et Valery HAMBATE GOMDJE<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure des Mines et des Industries Pétrolières,  
Département de Sécurité industrielle, Qualité et Environnement, BP 08, Kaélé, Cameroun*

<sup>2</sup> *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure des Mines et des Industries Pétrolières, Département  
d'Exploration Minière, Pétrolière, Gazière et des Ressources en Eau, BP 08, Kaélé, Cameroun*

<sup>3</sup> *Institut National Supérieur de Pétrole de Mao, Département d'Exploitation des Hydrocarbures, Mao, Tchad*

<sup>4</sup> *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure des Mines et des Industries Pétrolières, Département de  
Raffinage et Pétrochimie, BP 08, Kaélé, Cameroun*

<sup>5</sup> *Université d'Ebolowa, Institut Supérieur de l'Agriculture, du Bois, de l'Eau et de l'Environnement,  
Département de Génie Rural, BP 118, Ebolowa, Cameroun*

<sup>6</sup> *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Département de Génie Textile et Cuir,  
BP 46, Maroua, Cameroun*

(Reçu le 17 Octobre 2024 ; Accepté le 16 Décembre 2024)

---

\* Correspondance, courriel : [aguiza\\_abai@yahoo.fr](mailto:aguiza_abai@yahoo.fr)

### **Résumé**

Les eaux souterraines sont grandement sollicitées par la population camerounaise pour ses besoins de consommation et ses activités ménagères. Cette forte sollicitation peut être source de la détérioration de sa qualité. L'objectif de cette étude est de comprendre les processus qui gouvernent l'hydrochimie des eaux de la zone rizicole de Maga au Cameroun. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sont appliquées aux résultats des analyses chimiques de 15 points d'échantillonnage. La moyenne de la TDS moyenne est de 119,44 mg/L traduisant des eaux faiblement minéralisées. Deux facteurs principaux de l'ACP expriment une variance totale de 76,29 % des 11 variables analysées. La combinaison ACP et CAH mettent en évidence deux processus principaux dans l'évolution hydrochimique des eaux étudiées à savoir l'hydrolyse des minéraux de la roche et les apports par infiltration des eaux de surface. Les facteurs naturels et les activités anthropiques régissent l'hydrochimie des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga.

**Mots-clés :** *analyse en composante principale, classification ascendante hiérarchique, minéralisation, eaux souterraines, Maga.*

## Abstract

### **Application of multivariate statistical methods to the study of groundwater mineralization in the rice-growing area of Maga, Far North Cameroon**

Groundwater is in great demand by the Cameroonian population for its consumption needs and household activities. This heavy demand can be a source of deterioration in its quality. The objective of this study is to understand the processes that govern the hydrochemistry of the waters of the Maga rice growing area in Cameroon. Principal Component Analysis (PCA) and Ascending Hierarchical Classification (CAH) are applied to the results of chemical analyzes of 15 sampling points. The average TDS is 119.44 mg/L, reflecting weakly mineralized waters. Two main factors of the PCA express a total variance of 76.29 % of the 11 variables analyzed. The combination of CPA and AHC highlights two main processes in the hydrochemical evolution of the waters studied, namely the hydrolysis of rock minerals and the contributions by infiltration of surface water. Natural factors and anthropogenic activities govern the hydrochemistry of groundwater in the Maga rice growing area.

**Keywords :** *principal component analysis, ascending hierarchical classification, mineralization, groundwater, Maga.*

## 1. Introduction

L'accès à l'eau potable pour l'alimentation humaine et les activités ménagères fait partie des problèmes auxquels sont confrontés de manière générale les gouvernements du monde et celui du Cameroun en particulier [1, 2]. Si le Cameroun dispose d'un grand nombre de cours d'eau, l'utilisation des eaux de ces cours d'eau pour l'alimentation reste limitée à cause du coût élevé de leur traitement. Pour résoudre le problème d'accès à cette denrée noble, la population se tourne de plus en plus vers l'exploitation des nappes souterraines par le biais des forages publics et individuels, dont les eaux pour la majorité ne sont soumises à aucun traitement préalable avant leur utilisation. Or une forte sollicitation des eaux souterraines couplées à l'accroissement des activités humaines sont sources de graves problèmes sur la qualité de ces eaux [3, 4]. Si la composition chimique d'une eau issue d'un milieu est fonction de la nature géologique du sol d'où elle est prélevée ainsi que des substances réactives avec lesquelles elle entre en contact lors de son écoulement [5, 6], il est à noter que sa qualité peut aussi être altérée par des substances extérieures issues des activités anthropiques entrant en contact avec la nappe aquifère [7, 8]. Cependant les projets CBLT/BGR ont mis en évidence l'importance des nombreuses zones humides dans le bassin du lac Tchad ainsi que leur contribution au renouvellement des ressources en eaux souterraines du bassin [9, 10]. Les rizières de Maga situées dans ce bassin restent engorgées d'eau durant la période culturale, pouvant contribuer ainsi au renouvellement des ressources souterraines. Les techniques de culture et les intrants agricoles utilisés pour amender les champs peuvent avoir une influence sur le mode d'infiltration des eaux de surfaces en profondeur et apporter une modification des caractéristiques hydrochimiques des eaux dans les nappes souterraines. Les processus définissant l'hydrochimie des eaux souterraines étant donc diversifiés, leurs compréhensions peuvent être facilitées par l'application des méthodes statistiques multivariées. Ces méthodes appliquées à des études antérieures [7, 11 - 13] ont permis la compréhension des processus influençant l'hydrochimie des eaux souterraines. Ces méthodes statistiques ont également été utilisées pour étudier les effets des activités anthropogéniques sur la minéralisation des eaux souterraines et de surface [11, 12, 14]. L'objectif de cette étude est la caractérisation hydrochimique des eaux de la zone rizicole de Maga pour permettre la compréhension de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de ce périmètre agricole. L'approche méthodologique est fondée sur la détermination de la Classification hydrogéochimique des eaux souterraines à partir du diagramme de Piper et l'utilisation des méthodes statistiques multivariées à savoir l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) [12].

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Présentation de la zone d'étude

Le périmètre rizicole de Maga est situé dans la Région de l'Extrême-Nord du Cameroun. Ce périmètre est compris entre  $10^{\circ}32'57''$  et  $11^{\circ}58'00''$  de latitude Nord et entre  $14^{\circ}34'$  et  $15^{\circ}10'13''$  de longitude Est et couvre une superficie de 2000 km<sup>2</sup> [15 - 17]. Le climat de la zone est de type sahélo-soudanien, avec une longue saison sèche qui commence au début du mois d'octobre et se termine au début du mois de mai et une courte saison de pluie, de juin à septembre [18]. La morphologie est dominée par une plaine inondable qui fait partie d'une vaste unité géomorphologique qui s'étend au Nigeria, au Niger et au Tchad [19, 20]. Maga est situé dans la Plaine d'inondation Logone-Chari qui se compose de formations quaternaires récentes et anciennes du bassin du lac Tchad. L'épaisseur de ces formations varie généralement entre 50 et 70 m [19]. Les vertisols et les argiles noires hydromorphes sont les sols dominants [20].

### 2-2. Échantillonnage et approche méthodologique

Afin d'étudier la qualité des eaux souterraines, 15 points de prélèvements des échantillons ont été retenus. Chaque point a fait l'objet de 06 campagnes d'échantillonnage. Le choix de chacun des 15 points d'échantillonnage a tenu compte des critères comme la profondeur du niveau des eaux souterraines et l'emplacement du point par rapport à la lithologie. Le pH, la température, la TDS et la CE ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde multiparamètres de marque Hanna HI 98130. Pour les analyses chimiques, les échantillons ont été transportés et stockés au laboratoire selon les méthodes standard de l'OMS [21]. Les analyses ont été menées suivant les méthodes suivantes : la volumétrie pour les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), hydrogénocarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) ; la spectrophotométrie pour les ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) ; la photométrie à flamme pour le dosage des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ). Ces analyses sont conformes aux méthodes recommandées par [21, 22]. L'ensemble des résultats obtenus de l'analyse des eaux souterraines collectées a fait l'objet d'une analyse hydrochimique et statistique. Le digramme de Piper [23, 24] a servi pour l'analyse hydrochimique afin de caractériser les faciès géochimiques des eaux étudiées. Le logiciel Diagramme 6.57 a été utilisé pour ces traitements hydrochimiques. La statistique multivariée a été effectuée par une Analyse en Composantes Principales (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Cette analyse statistique a été réalisée sur la moyenne générale des données de 11 variables et 90 échantillons en utilisant le logiciel XLSTAT 2018. Cette analyse statistique permet de récapituler et de classer les données afin de permettre d'extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution concomitante des variables et de leur relation réciproque [25].

## 3. Résultats et discussion

### 3-1. Caractéristiques hydrochimiques

Les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga sont regroupés dans le **Tableau 1**. Une analyse de ces résultats montre que les eaux souterraines sont moyennement minéralisées, avec des valeurs de TDS variant entre 58,33 et 436,67 mg/L, pour une moyenne de  $199,44 \pm 118,32$  mg/L. Ces eaux présentent de fortes teneurs en Sodium et en Bicarbonates. Les teneurs en sodium sont comprises entre 21,34 et 200,17 mg/L pour une moyenne de  $81,14 \pm 53,15$  mg/L. Les bicarbonates quant à elles varient de 96,58 à 552,59 mg/L avec une moyenne de  $276,87 \pm 146,23$  mg/L. Les composés azotés par contre présentent des teneurs moyennes soit une moyenne de  $12,95 \pm 13,35$  mg/L pour les nitrates et  $3,46 \pm 2,24$  mg/L pour l'ammonium.

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques des eaux

Point	TDS (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)
F01	143,33	1,67	8,33	83,27	1,65	1,73	0,47	6,63	1,17	251,08	0,52
F02	111,67	1,50	5,67	57,09	1,48	2,20	0,72	6,82	1,17	171,17	0,48
F03	81,67	1,67	6,17	45,77	1,43	2,02	0,27	9,53	1,83	149,25	1,02
F04	198,33	1,67	11,00	84,87	2,03	3,73	0,67	8,37	0,83	281,28	0,50
F05	305,00	3,83	8,33	187,16	1,42	1,83	1,47	8,13	1,00	525,91	0,48
F06	83,33	4,17	8,50	22,81	1,32	1,65	0,35	6,87	1,33	116,11	0,32
F07	58,33	1,50	8,00	21,34	1,43	4,82	0,53	7,55	1,17	96,58	0,43
F08	255,00	3,67	14,67	105,28	1,97	1,52	0,85	9,15	1,17	352,91	1,03
F09	393,33	30,83	21,00	115,06	3,32	9,02	0,85	13,35	1,33	552,59	2,05
P01	103,33	3,33	7,67	47,67	1,47	7,78	0,57	11,18	0,67	162,59	1,03
P02	263,33	1,50	14,67	77,03	1,93	2,67	0,83	11,68	1,33	303,97	1,63
P03	105,00	6,67	9,67	47,70	1,60	2,28	1,28	16,65	5,67	168,53	0,35
P04	171,67	10,33	9,67	44,97	1,58	4,05	0,93	8,95	0,67	209,70	4,73
P05	436,67	12,33	14,00	200,17	2,00	3,47	27,52	60,18	17,67	459,65	0,37
P06	281,67	12,17	17,00	76,99	2,87	3,12	3,12	9,23	1,00	351,77	3,30
Min	58,33	1,50	5,67	21,34	1,32	1,52	0,27	6,63	0,67	96,58	0,32
Max	436,67	30,83	21,00	200,17	3,32	9,02	27,52	60,18	17,67	552,59	4,73
Moy	199,44	6,46	10,96	81,14	1,83	3,46	2,69	12,95	2,53	276,87	1,22
Ecart-type	118,32	7,79	4,37	53,15	0,57	2,24	6,90	13,35	4,36	146,23	1,27

### 3-2. Faciès hydrochimique

Le diagramme de piper (*Figure 1*) montre que les eaux étudiées ont un faciès du type bicarbonaté sodique et potassique. Ce faciès d'eau a une dominance des acides faibles avec une dominance des alcalins (Na<sup>+</sup>) sur les alcalino-terreux (Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>). Ainsi, pour les cations, les eaux sont enrichies en sodium et potassium alors que les bicarbonates restent l'anion dominant. L'ordre d'importance de représentativité des ions majeurs dans les eaux étudiées se présente comme suit : Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pour ce qui est des cations, et, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> pour les anions.

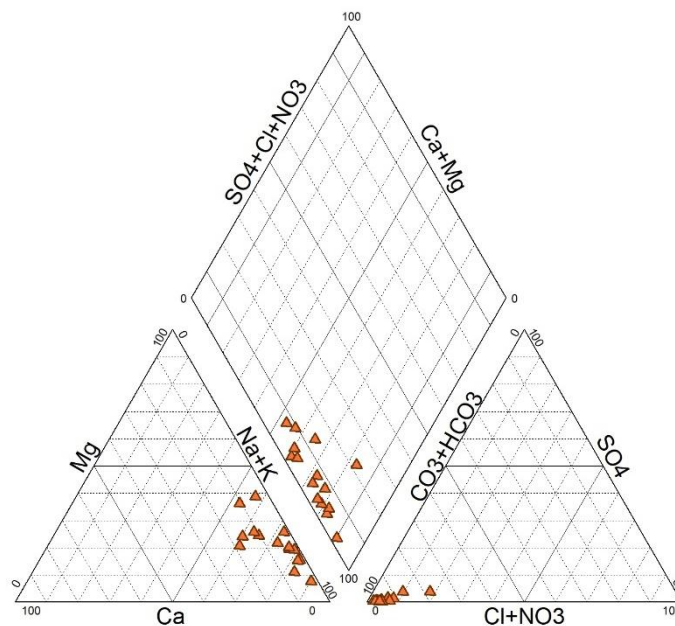


Figure 1 : Faciès hydrochimique des eaux souterraines de Maga

### 3-3. Analyse en Composantes Principales de l'hydrochimie des eaux souterraines

Le coefficient de corrélation est couramment utilisé pour établir la relation entre deux variables [13]. La matrice des coefficients de corrélation de Pearson de 11 variables et 15 points d'échantillonnage des eaux souterraines est donnée dans le *tableau 2*. Les valeurs de TDS présentent une corrélation positive ( $r > 0,6$ ) avec  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ . Ceci indique une minéralisation d'origine évaporitique ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ) et carbonaté ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) de ces éléments dans l'eau. Pour la relation entre les anions et les cations, il y a des corrélations significatives entre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r = 0,7$ ),  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  ( $r = 0,8$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$  ( $r = 0,9$ ),  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = 0,7$ ),  $\text{Na}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = 0,8$ ),  $\text{Cl}^-$  et  $\text{NO}_3^-$  ( $r = 0,9$ ),  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0,9$ ) et  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $r = 0,9$ ) puis des corrélations modérées entre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = 0,6$ ),  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,6$ ),  $\text{Na}^+$  et  $\text{NO}_3^-$  ( $r = 0,6$ ) et  $\text{K}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  ( $r = 0,6$ ). Il faut noter que la corrélation modérément significative entre le chlorure et le sodium peut s'expliquer par l'implication des ions sodium au phénomène d'échange cationique avec le substratum argileux de l'aquifère. La corrélation fortement significative entre le magnésium et le potassium s'explique par le fait que pendant qu'il y a substitution du calcium par le sodium lors du processus d'échange de base, le magnésium qui fait partie des alcalino-terreux n'est pas remplacé par le potassium de la classe des alcalins. Ce processus d'échange de base expliquerait également les corrélations entre le calcium et le magnésium d'une part et entre le calcium et le potassium d'autre part. Le  $\text{NO}_3^-$  présente une corrélation forte à modérée avec les  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  indiquant l'effet des activités anthropiques telles que les activités agricoles, sources de pollution des eaux souterraines [26, 27].

**Tableau 1 : Coefficients de corrélation de Pearson pour les paramètres physico-chimiques**

	TDS	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
TDS	1										
Ca <sup>2+</sup>	0,640	1									
Mg <sup>2+</sup>	0,785	0,760	1								
Na <sup>+</sup>	0,857	0,315	0,395	1							
K <sup>+</sup>	0,690	0,808	0,923	0,308	1						
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,214	0,627	0,386	-0,029	0,479	1					
Cl <sup>-</sup>	0,592	0,237	0,237	0,641	0,131	-0,005	1				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,582	0,293	0,271	0,609	0,149	0,076	0,978	1			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,480	0,207	0,168	0,556	0,050	-0,057	0,958	0,981	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,942	0,615	0,701	0,882	0,651	0,204	0,383	0,373	0,281	1	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,197	0,425	0,379	-0,145	0,401	0,256	-0,139	-0,161	-0,253	0,126	1

Les valeurs en gras indiquent les variables corrélées au niveau de 0,05

L'analyse en composante principale a été effectuée à l'aide de la moyenne de 11 variables (TDS, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) des 90 échantillons analysés. L'utilisation de l'analyse fondamentale pour l'évaluation de la qualité de l'eau est nécessaire surtout pour obtenir une réduction appréciable des données pour l'analyse et la prise de décision [28]. L'ACP réalisée sur les échantillons des eaux souterraines a été arrêtée aux deux premiers facteurs (*Tableau 3*), exprimant 76,29 % de la variance totale.

**Tableau 2 : Valeur propre à chaque axe et sa contribution**

	F1	F2
Valeur propre	5,498	2,894
Variabilité (%)	49,980	26,308
% cumulé	49,980	76,289

Le facteur F1 exprime 49,98 % de la variance totale, il est présenté positivement par TDS,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{HCO}_3^-$  avec des valeurs de 0,95, 0,74, 0,79, 0,78, 0,72, 0,70 et 0,86 respectivement (**Tableau 4**). L'association de la TDS avec ces éléments est due aux différents processus hydrochimiques qui augmentent la salinité de l'eau. L'axe F1 représente donc un axe de minéralisation évaporitique et salifère.

**Tableau 4 :** *Corrélations entre les variables et les facteurs*

	F1	F2
TDS	0,959	-0,031
$\text{Ca}^{2+}$	0,749	-0,487
$\text{Mg}^{2+}$	0,793	-0,466
$\text{Na}^+$	0,785	0,337
$\text{K}^+$	0,726	-0,584
$\text{NH}_4^+$	0,343	-0,510
$\text{Cl}^-$	0,692	0,648
$\text{NO}_3^-$	0,706	0,622
$\text{SO}_4^{2-}$	0,612	0,711
$\text{HCO}_3^-$	0,862	-0,128
$\text{PO}_4^{3-}$	0,181	-0,628

Le facteur F2 exprime 26,30 % de la variance totale pour l'ensemble des données analysées. Il est positivement lié à  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ , puis négativement lié à  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{NH}_4^+$ , ce qui permet de dire que c'est le facteur de la pollution anthropique. Des quantités importantes d'engrais sont appliquées en riziculture dans la zone d'étude. La mise en eau des parcelles rizicoles favorise la lixiviation de ces engrais qui seront transportés vers les eaux souterraines. Le facteur F1 contrôle à lui seul 49,98 % de l'inertie du nuage des points représentatifs des échantillons. Ce facteur est déterminé positivement par la TDS, les bicarbonates, le magnésium, le sodium, le potassium, les nitrates et les chlorures (**Figure 2**). L'axe F1 de par sa forte corrélation avec les variables peut être considéré comme l'axe de la minéralisation. Autour de cet axe, les espèces contribuant fortement à la minéralisation ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) s'opposent aux espèces dont les teneurs sont faibles ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ). Le facteur F2 exprime 26,31 % de la variance. Il est caractérisé positivement par les concentrations en  $\text{SO}_4^{2-}$  et négativement par  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  et  $\text{K}^+$  bien qu'il n'existe pas une forte corrélation entre ces éléments. Les éléments situés dans le pôle négatif sont des indicateurs de la pollution d'origine anthropique. La projection des individus sur le plan F1-F2 montre que suivant l'axe F1, il y'a une évolution de la minéralisation suivant le sens d'écoulement des eaux pour les points situés dans la partie ouest de la zone (**Figure 3**). Trois grands groupes sont mis en évidence. Le groupe 1 représenté par le point P05 qui témoigne une pollution d'origine anthropique, le groupe 2 constitué des points F09 et P06 qui révèlent une forte minéralisation avec un apport important des alcalino-terreux et des éléments issus du lessivage des engrais. Le groupe 3 qui montre une minéralisation faible à moyenne qui est représenté par la majorité des échantillons. L'axe F2 montre une opposition entre les éléments qui témoignent une pollution d'origine anthropique à ceux issus de la dissolution des minéraux contenus dans la roche.

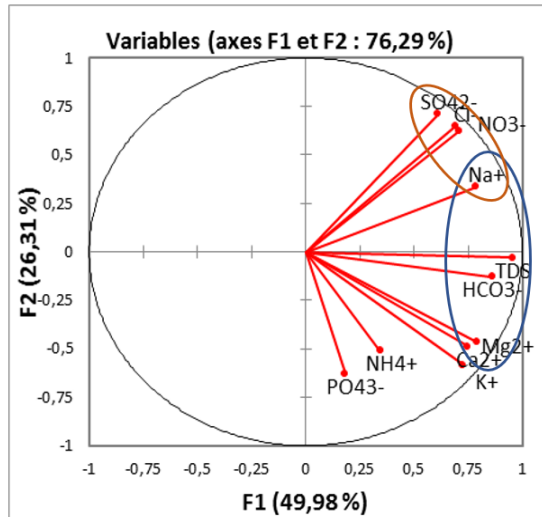


Figure 2 : Espace des variables de l'ACP

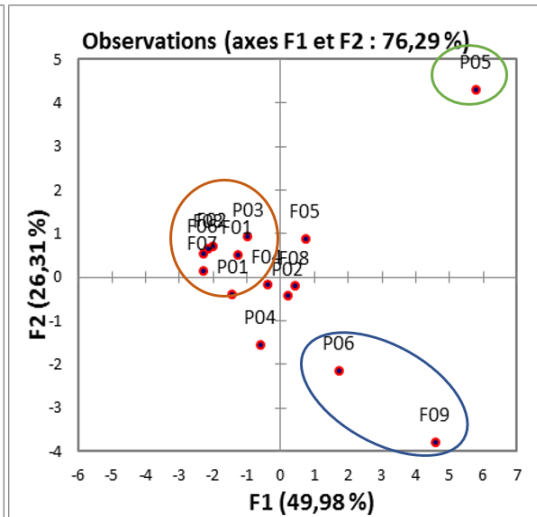


Figure 3 : Espace des individus de l'ACP

### 3-4. Classification Ascendante Hiérarchique de l'hydrochimie des eaux souterraines

La CAH a été appliquée en utilisant la distance Euclidienne comme distance de mesure entre les échantillons [29] et la méthode de Ward comme règle de liaison pour la classification des données hydrogéochimiques des eaux souterraines [30]. Le dendrogramme des 11 paramètres physicochimiques est divisé en trois groupes principaux (Figure 4). Le premier groupe G1 montre une étroite association entre la TDS et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Le deuxième groupe G2 montre une association étroite entre NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Ces éléments présentent des teneurs moyennes dans la plupart des points d'échantillonnage. Le troisième groupe G3 est constitué essentiellement de Na<sup>+</sup> qui a des teneurs élevées dans la majorité des points d'échantillonnage. Ces résultats sont en conformité avec ceux de l'analyse de corrélation. Le dendrogramme des sites d'échantillonnage a produit quatre groupes majeurs (Figure 5). Les groupes G1 (F01, F04 et P04) et G2 (F02, F03, F06, F07, P01 et P03) sont formés des points d'échantillonnage à minéralisation faible à moyenne. Ces groupes sont essentiellement des points situés à l'amont du sens d'écoulement des eaux. Les groupes G3 (F05, F09 et P05) et G4 (F08, P02 et P06) par contre sont constitués des points à forte et très forte minéralisation. Ces points à l'exception de P05, sont situés sur l'axe des écoulements des eaux souterraines et traduisent une accumulation des teneurs des éléments chimiques. Ces résultats expliquent la source de minéralisation des eaux de la zone d'étude comme démontré dans les travaux de [31].

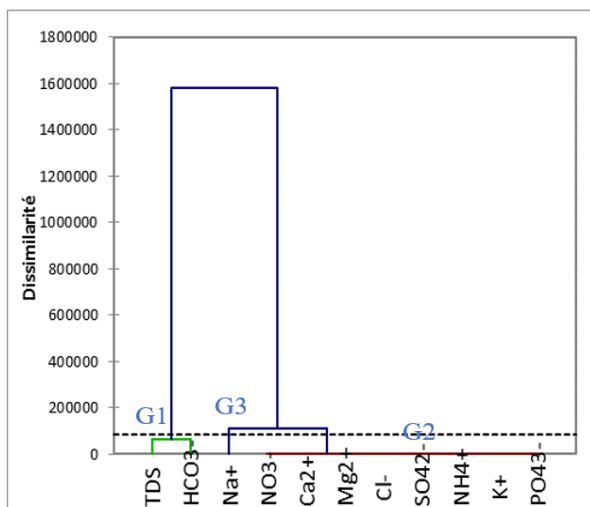


Figure 4 : Dendrogramme des variables

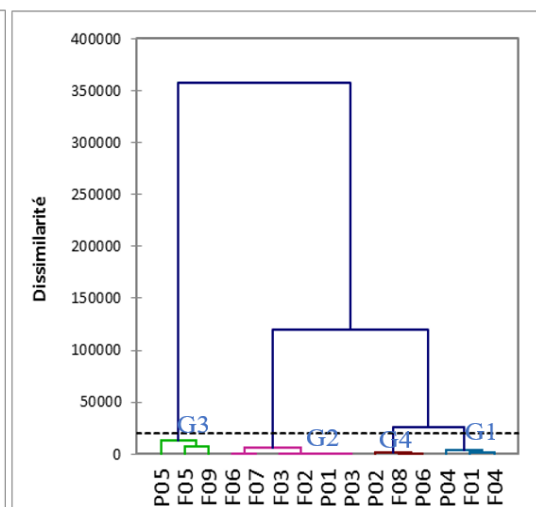


Figure 5 : Dendrogramme des sites d'échantillonnage

#### 4. Conclusion

Le présent travail avait pour but de comprendre les mécanismes qui contrôlent la minéralisation des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga à partir des techniques d'analyse statistique multivariée (ACP et CAH). De manière générale, les eaux sont moyennement minéralisées avec une TDS moyenne de  $199,44 \pm 118,32$  mg/L. Les ions ammonium présente des concentrations supérieures aux limites recommandées par l'OMS pour les eaux de consommation humaine. Un point a également des concentrations en ions nitrates supérieures à 50 mg/L. L'ACP a montré que les deux premiers facteurs F1 et F2 totalisent 76,29 % de la variance totale exprimée par les 11 variables. La CAH fait ressortir trois groupes principaux pour les 11 variables. L'analyse simultanée de l'ACP et la CAH révèle que les caractéristiques hydrogéochimiques des eaux souterraines sont principalement contrôlées par deux grands processus à savoir l'hydrolyse des minéraux silicatés contenus dans la roche et l'apport par les activités anthropiques. Cette étude a permis d'élucider les processus qui régissent la minéralisation des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga.

#### Références

- [1] - F. C. DHIN ETIA, G. MVOGO & B. HONORE, Les déterminants d'accès à l'eau potable au Cameroun. *African Development Review*, 34 (1) (2022) 154 - 170
- [2] - T. D. SORO, O. L. BLE, G. Y. M. KONE, Y. M. S. OGA et N. SORO, Qualité et origine de la minéralisation des eaux souterraines du département de grand-Lahou (Sud-Ouest de la Cote d'Ivoire). *Int. J. Adv. Res.*, 10 (09) (2021) 359 - 367
- [3] - S. MOR, K. RAVINDRA, R. P. DAHIYA et A. CHANDRA, Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environ Monit Assess*, 118 (2006) 435 - 456
- [4] - A. O. DENONSI, N. AGOÏNON et J. B. K. VODOUNOU, Qualités physiques, chimiques et bactériologiques de l'eau de puits dans la commune de Ouessè, centre-Bénin. *Afrique SCIENCE*, 22 (4) (2023) 47 - 61
- [5] - C. BAKOUAN, B. GUEL & A. L. HANSTON, Caractérisation physico-chimique des eaux des forages des villages de Tanlili et Lilgomdé dans la région du Nord du Burkina Faso-Corrélation entre les paramètres physico-chimiques. *Afrique Science*, 13 (6) (2017) 325 - 337
- [6] - A. NONO, J. D. H. LIKENG, H. WABO, G. T. YOUUMBI & S. BIAYA, Influence de la nature lithologique et des structures géologiques sur la qualité et la dynamique des eaux souterraines dans les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3 (2) (2009) 218 - 239
- [7] - J. YUAN, F. XU, G. DENG, Y. TANG & P. LI, Hydrogeochemistry of shallow groundwater in a karst aquifer system of Bijie City, Guizhou Province. *Water*, 9 (8) (2017) 625
- [8] - K. E. AHOUSSE et A. P. YAPO, Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, 19 (4) (2021) 36 - 50
- [9] - K. SEEBER, 2nd Discharge Measurements at Chari, Logone and Koulambou River, Chad Report N° 6. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT, (2013)
- [10] - S. VASSOLO et D. DAIRA, Project Activities - Report N° 4. Hannover-N'Djamena : BGR-CBLT, (2012). <http://www.bgr.bund.de/lcbc>
- [11] - S. M. YIDANA, G. B. YIRAN, P. A. SAKYI, P. M. NUDE & B. BANOENG-YAKUBO, Groundwater evolution in the Voltaian Basin, Ghana-an application of multivariate statistical analyses to hydrochemical data. *Natural Science*, 3 (10) (2011) 837 - 854
- [12] - E. F. IDRISSE & S. HINAJE, Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des causses de Sefrou et de l'Anoceur (Moyen Atlas marocain) par les méthodes hydrogéochimiques et statistiques. *Geo-Eco-Trop*, 41 (1) (2017) 119 - 134



- [13] - K. S. A. YAO & K. E. AHOUSI, Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines dans un environnement minier du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du Département de Divo. *Afrique SCIENCE*, 18 (4) (2021) 53 - 68
- [14] - K. H. KIM, S. T. YUN, B. Y. CHOI, G. T. CHAE, Y. JOO, K. KIM & H. S. KIM, Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea). *Journal of contaminant hydrology*, 107 (3-4) (2009) 114 - 127
- [15] - O. LEUMBE, D. BITOM, L. MAMDEM, D. TIKI et A. IBRAHIM, Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne : cas de Maga et ses environs dans la région de l'extrême-nord Cameroun. *Afrique SCIENCE*, 11 (3) (2015) 45 - 61
- [16] - D. SIGHOMNOU, Gestion intégrée des eaux de crues - Cas de la plaine d'inondation du fleuve Logone. WMO-GWP, (2003) 18 p.
- [17] - J. L. SCHNEIDER et J. P. WOLFF, Carte Géologique et Carte Hydrogéologique 1/1500000 de la république du Tchad Mémoire Explicatif, Orléance, France : BRGM, Vol. 1, N°209 (1992)
- [18] - B. N. NGATCHA, J. MUDRY, A. WAKPONOU, G. E. EKOUECK et J. SARROT REYNAULD, Le cordon sableux Limani-Yagoua (Nord Cameroun) et son rôle hydraulique. *J. Afr. Earth Sci.*, 32 (2001) 307 - 316
- [19] - R. BISCALDI, Carte Hydrogéologique de la plaine du Tchad Nappe Phréatique Echelle : 1/200000 Notice Explicative. Yaoundé : BRGM, (1970)
- [20] - P. BRABANT and M. GAVAUD, Soils and Land Ressources in Northern Cameroon. Coll Notice Explicative 103. MESIRES-IRA Yaounde, ORSTOM, (1985) 285 p.
- [21] - OMS, Guidelines to Drinking-water Quality (fourth edition). (NLM classification : WA 675). OMS, (2011) 564 p.
- [22] - J. RODIER, B. LEGUBE et N. MERLET, Analyse de l'eau. 9ème édition. Ed. Dunod, Paris, (2009) 1526 p.
- [23] - A. M. PIPER, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Ground water Notes, USGS, N° 12 (1953) 14 p.
- [24] - A. B. HASSANE, Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey, (2010) 249 p.
- [25] - J. BIEMI, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1992) 480 p.
- [26] - H. TRAORE, B. G. SEGDA & J. M. DIPAMA, Pollution des eaux souterraines par les nitrates : cas du sous bassin du Massili au Burkina Faso. *Sciences Naturelles et Appliquées*, 43 (1) (2024) 71 - 86
- [27] - G. SORO, T. D. SORO, O. A. ADJIRI & N. SORO, Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13 (3) (2019) 1870 - 1889
- [28] - M. LAAKSOHARJU, I. GURBAN, C. SKARMAN et E. SKARMAN, Multivariate mixing and mass balance (M3) calculation, a new tool for decoding hydrogeochemical information, *Appl. Geochem*, 14 (1999) 861 - 871
- [29] - M. T. HUSSEIN, Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal*, 12 (2004) 144 - 158
- [30] - V. CLOUTIER, R. LEFEBVRE, R. THERRIEN and M. M. SAVARD, "Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system," *J. Hydrol.*, Vol. 355, (2008) 294 - 313
- [31] - P. DOUMTOUDJINODJI, B. E. MANOU, J. C. D. MBAIGANE, N. DJOUEINGUE, U. AGNICHOLA & A. S. AMADOU, Hydrochemical Characterisation and Assessment of the Level of Contamination of Groundwater Collected by Private Waterworks in the Town of Moundou in the South of Chad. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12 (01) (2024) 13 - 32