

## **CARACTÉRISATION DES EAUX SOUTERRAINES DU MAYOMBE AU SUD-OUEST DE LA RÉPUBLIQUE DU CONGO PAR LES MÉTHODES GÉOCHIMIQUES ET STATISTIQUES**

**Médard NGOUALA MABONZO**

*Université Marien Ngouabi, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines,  
Laboratoire de Géographie, d'Environnement et d'Aménagement (LAGEA),  
BP 69, Brazzaville, République du Congo*

---

\* Correspondance, e-mail : [medngouala@yahoo.fr](mailto:medngouala@yahoo.fr)

### **RÉSUMÉ**

L'étude hydrochimique des eaux souterraines du Mayombe au sud-ouest de la République du Congo a été réalisée à partir de 38 points. Les analyses chimiques réalisées sur les eaux souterraines ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques. Une première approche qui est basée sur l'utilisation de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et une seconde représentée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La combinaison de ces deux méthodes a apporté des connaissances sur l'origine de la minéralisation des eaux. Les eaux souterraines sont acides, avec un pH moyen environ égal à 6. Les teneurs en ions majeurs sont faibles pour l'ensemble des points d'eau étudiés. Elles sont largement inférieures aux normes admissibles par l'OMS. Les eaux souterraines présentent des teneurs en cations qui varient entre 0,09 et 23,67 mg.L<sup>-1</sup> ; 0,34 et 35,33 mg.L<sup>-1</sup> en anions. La minéralisation des eaux de cette région est principalement régie par les phénomènes de dissolution et de précipitation des minéraux (calcite, dolomite, anhydrite, gypse et halite). Cette étude montre également l'existence de trois grandes familles d'eau (les eaux chlorurées et sulfatées, calciques et magnésiennes ; les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes et les eaux chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques) dans l'ensemble de cette région.

**Mots-clés :** *hydrochimie, Mayombe, Loémé, Congo.*

**Médard NGOUALA MABONZO**

## ABSTRACT

### Characterization of Mayombe groundwater in the South-West of the Republic of Congo by geochemical and statistical methods

The hydrochemical study of the Mayombe groundwater in the southwest of the Republic of Congo was carried out from 38 points. Chemical analyzes performed on groundwater were processed using a combination of statistical methods. A first approach which is based on the use of the Ascending Hierarchical Classification (CAH) and a second represented by the Principal Component Analysis (PCA). The combination of these two methods has brought knowledge about the origin of mineralization of waters. Groundwater is acidic, with an average pH of approximately 6. The major ion contents are low for all of the water points studied. They are far below the standards admissible by the WHO. Groundwater has cation contents which vary between 0.09 and 23.67 mg.L<sup>-1</sup>; 0.34 and 35.33 mg.L<sup>-1</sup> in anions. The mineralization of the waters of this region is mainly governed by the phenomena of dissolution and precipitation of minerals (calcite, dolomite, anhydrite, gypsum and halite). This study also shows the existence of three major families of water (chlorinated and sulphated, calcium and magnesian water; bicarbonate calcium and magnesian water and sodium chlorinated and potassium or sodium sulphated water) throughout this region.

**Keywords :** *hydrochemistry, Mayombe, Loémé, Congo.*

## I - INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, l'eau a toujours été considérée comme une source renouvelable et inépuisable. De nos jours, plusieurs pays sont touchés par l'épuisement de leurs ressources en eau, du fait des conditions climatiques et de l'accroissement de la demande [1], résultat inéluctable de la croissance démographique et du développement socio-économique. La caractérisation et le diagnostic de qualité d'une eau souterraine passe toujours par des prélèvements réguliers d'échantillons aux endroits de captage (puits, piézomètres, sources, châteaux) et l'analyse de différents paramètres bio-physico-chimiques. Si certains éléments chimiques permettent de caractériser l'aquifère (lithologie), d'autres éléments sont liés à des contaminations anthropiques (nitrates, pesticides, etc.). Certains éléments, tels que les nitrates, sont d'excellents indicateurs quant aux pressions qualitatives exercées sur les nappes [2]. La République du Congo dont la richesse des ressources en eau est évidente ne s'est pas encore dotée d'un inventaire complet de son potentiel en eau de surface et souterrain [4]. Un inventaire

hydrologique, hydrogéologique et hydrochimique au Congo est nécessaire pour compléter la connaissance de son potentiel en eau, mais aussi pour comprendre le fonctionnement de ses aquifères. L'aquifère du Mayombe constitue une ressource en eau de grande importance pour la République du Congo grâce à la qualité des eaux et des volumes ( $30.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$  pour l'ensemble du bassin côtier du Congo) [3]. En effet, ces eaux sont utilisées comme eaux de boisson pour les populations locales et en faible proportion dans les activités agricole et d'élevage ou pâturage des bêtes et cela à défaut de connaissances sur les éléments physico-chimiques comme : la température, la conductivité, le pH, le calcium, le magnésium, sodium, le potassium, le bicarbonate, le sulfate, le nitrate, le chlore, etc.... Ces éléments sont importants pour apprécier sa potabilité. Ceci constitue non seulement un risque pour la santé des populations consommatrices de la ressource, mais aussi un handicap pour la communauté scientifique. Par ailleurs, ces eaux sont aussi beaucoup sollicitées en aval (Pointe-Noire) dans un but essentiellement agricole, industriel, et d'alimentation en eau potable (AEP). C'est dans ce contexte que s'insère cette étude qui a pour objectif de préciser les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines du Mayombe et d'étudier l'évolution spatio-temporelle de la minéralisation de ses eaux en passant par des méthodes géochimiques et statistiques; ceci afin d'assurer une gestion qualitative de ces ressources dans la région du Mayombe.

## II - MÉTHODOLOGIE

### II-1. Cadre général d'étude

Le Mayombe est situé au sud-ouest de la République du Congo, entre les latitudes  $4^\circ$  et  $5^\circ$  Sud et les longitudes  $11^\circ 54'$  et  $12^\circ 40'$  Est (*Figure 1*). Il fait partie de deux unités orographiques que constitue la façade maritime du Congo à savoir la chaîne du Mayombe et la plaine côtière. Du point de vue géologique, le Mayombe est entièrement constitué de formations de soubassement ayant plusieurs orogènes d'âge précambrien. Ses sols sont rangés dans la catégorie des sols ferrallitiques moyennement désaturés, très dénaturés et extrêmement désaturés, appauvris sur matériaux sableux à sablo- argileux de la série de cirques, rajeunis sur pente, peu évolués d'érosion locale, et aptes à l'agriculture traditionnelle sur une surface importante [5]. Le Mayombe est dominé par la forêt qui couvre son ensemble. Son climat est du type tropical humide caractérisé par une alternance de deux saisons : une saison chaude et pluvieuse qui s'étend de novembre à avril et une saison sèche et fraîche de juin à septembre [6].



statistiques sont couramment utilisées dans le domaine des sciences de l'eau. L'Analyse en Composantes Principale (ACP) est une méthode statistique descriptive dont l'objectif est de présenter graphiquement le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est souvent une matrice dont les lignes représentent les individus (e.g. points d'eau) et les colonnes représentent les variables (pH, T°, CE, les éléments majeurs). Elle permet de réduire le nombre des variables afin de projeter le nuage de points dans un plan 2D [7, 8]. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une technique qui mesure la dissimilarité ou la similarité entre les échantillons afin de définir un critère d'agrégation des classes [9]. Les classes ainsi obtenues produisent un arbre binaire de classification appelé "dendrogramme". Les deux techniques statistiques sont traitées sous le logiciel XLSTAT. Quant à l'approche hydrochimique, le diagramme de Piper est utilisé pour la classification des eaux et pour définir les processus hydrochimiques plausibles dominant la chimie des eaux souterraines, telles que le mélange, échange d'ions et la dissolution affectant la composition des eaux souterraines. Les analyses ont été effectuées à partir des 11 variables suivantes : CE, pH, T°C, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>.

### III - RÉSULTATS

Les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines du Mayombe sont consignés dans le **Tableau 1**. L'analyse de ces résultats montre que les eaux souterraines de la zone d'étude sont moyennement minéralisées. La conductivité électrique (CE) des eaux varie entre 16,33 µS/cm et 47,17 µS/cm, avec une moyenne 31,88 µS/cm. Les eaux souterraines de cette zone sont acides, avec un pH qui varie entre 4,44 et 6,58 pour une moyenne de 5,59. Ces eaux présentent de faibles teneurs en éléments majeurs (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

#### III-1. Analyse statistique des concentrations des paramètres de base et des ions majeurs

Le **Tableau 1** présente les résultats d'analyses physico - chimiques dont nous proposons les valeurs obtenues pour l'ensemble des points étudiés.

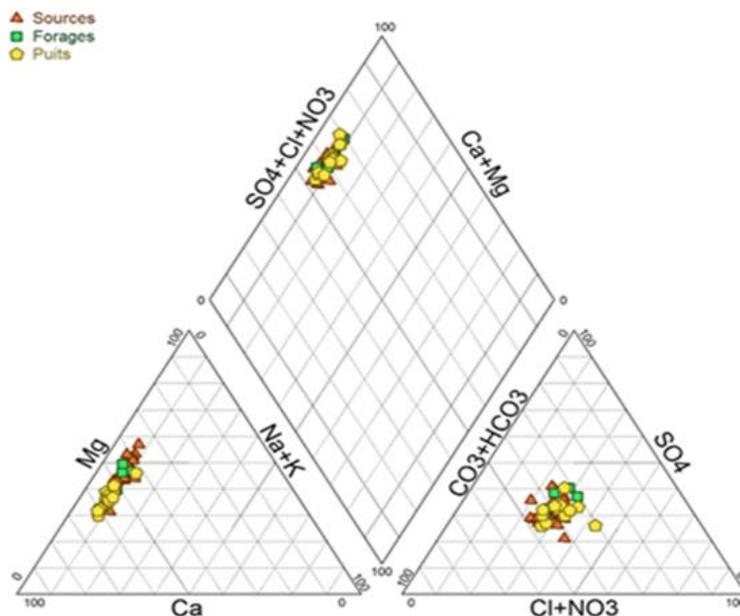
**Tableau 1 : Résultats des analyses physico - chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude (Mayombe)**

| Paramètres                     | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type | Variance |
|--------------------------------|---------|---------|---------|------------|----------|
| pH                             | 4,44    | 6,58    | 5,59    | 0,46       | 0,21     |
| CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 16,33   | 47,17   | 31,88   | 6,95       | 48,3     |
| T ( $^{\circ}\text{C}$ )       | 25,92   | 26,48   | 26,2    | 0,12       | 0,01     |
| $\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)        | 12,83   | 23,67   | 18,13   | 2,18       | 4,77     |
| $\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)        | 4,67    | 14,33   | 9,84    | 2,43       | 5,91     |
| $\text{Na}^{+}$ (mg/L)         | 0,09    | 0,49    | 0,22    | 0,1        | 0,01     |
| $\text{K}^{+}$ (mg/L)          | 4,08    | 7,73    | 5,57    | 0,75       | 0,56     |
| $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)      | 11      | 19,83   | 14,72   | 2,19       | 4,8      |
| $\text{Cl}^{-}$ (mg/L)         | 6,71    | 14,32   | 23,42   | 1,28       | 1,66     |
| $\text{HCO}_3^{-}$ (mg/L)      | 16,17   | 35,33   | 23,42   | 4,71       | 22,16    |
| $\text{NO}_3^{-}$ (mg/L)       | 0,34    | 16,94   | 1,39    | 2,33       | 5,41     |

### III-2. Faciès chimique des eaux souterraines du Mayombe

Le faciès chimique des eaux souterraines du Mayombe a été déterminé classiquement à l'aide du diagramme de Piper. Les données des ions majeurs, reportées sur ce diagramme (**Figure 2**), ont permis d'identifier trois grandes familles d'eau dans l'ensemble de cet espace géographique:

- les eaux chlorurées et sulfatées, calciques et magnésiennes ;
- les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes ;
- les eaux chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques.

**Figure 2 : Diagramme de Piper des eaux souterraines du Mayombe**

L'essentiel des eaux souterraines de ces formations du Mayombe, à la lecture du diagramme (**Figure 2**) s'étalent entre le pôle hyperchloruré sodique et le pôle hyperchloruré calcique ou hyper sulfatée calcique. Cette variabilité sur des eaux faiblement minéralisées implique des sources diverses et ponctuelles. On peut d'ores et déjà penser aux pollutions provenant de la surface et qui sont liées aux composés organiques. En effet, la présence des éléments comme les nitrates, les chlorures, le sodium, le potassium et les sulfates peuvent être la conséquence des activités anthropiques. En marge de cette tendance générale, les eaux bicarbonatées montrent une influence notable du pôle bicarbonaté calcique et magnésien. On peut y voir, dans un aquifère siliceux, localement plus feldspathique, le rôle de l'interaction eau-roche. Le diagramme de *Schöeller-Berkaloff* (**Figure 3**) permet de représenter le faciès chimique des eaux souterraines des formations cristallines et cristallophylliennes du Mayombe. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. A travers la représentation, l'ensemble des eaux souterraines des formations cristallines et cristallophylliennes du Mayombe présentent un faciès chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne. Selon le diagramme de *Schöeller-Berkaloff* (**Figure 3**), les ions dominants sont les chlorures pour les anions et le magnésium pour les cations. Les concentrations s'ordonnent comme suit :  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++} > \text{Na} + \text{K}$ .

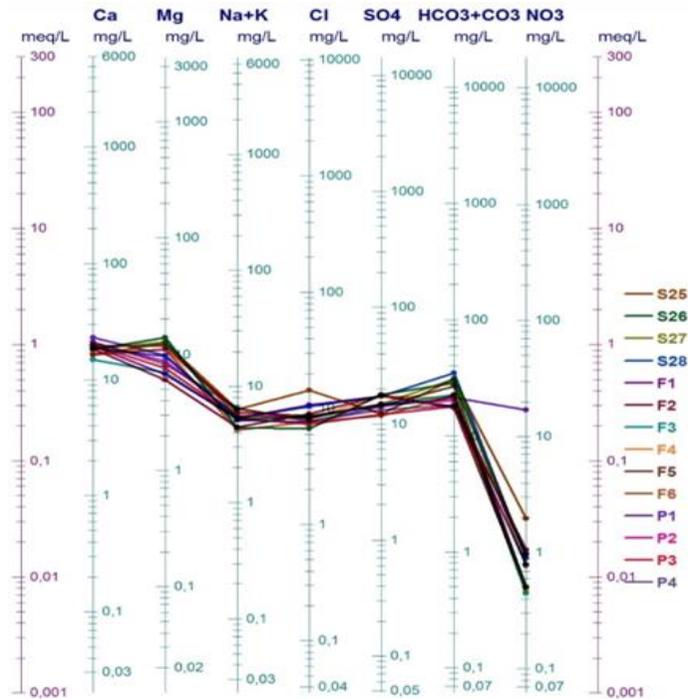


Figure 3 : Diagramme de Schöeller Berkloff

### III-3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Cette analyse multidimensionnelle des données est une méthode factorielle et linéaire qui traite des caractères numériques (dans notre cas, les résultats des analyses chimiques). Elle permet de mettre en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Au cours de ce travail, une analyse statistique (ACP) a été réalisée sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel XLSTAT. Les données portent sur l'ensemble des analyses relatives des quarante-huit stations (sources, forages et puits) des eaux souterraines. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est effectuée sur les moyennes interannuelles des analyses physico-chimiques. Les onze (11) variables traitées, concernent les paramètres physico-chimiques suivants : la conductivité (C.E), le potentiel d'hydrogène (pH), la température ( $T^{\circ}\text{C}$ ), les ions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ). L'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour l'étude globale des eaux souterraines permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble facteurs suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation. Les coefficients de corrélation entre les éléments sont reportés dans le **Tableau 2**.

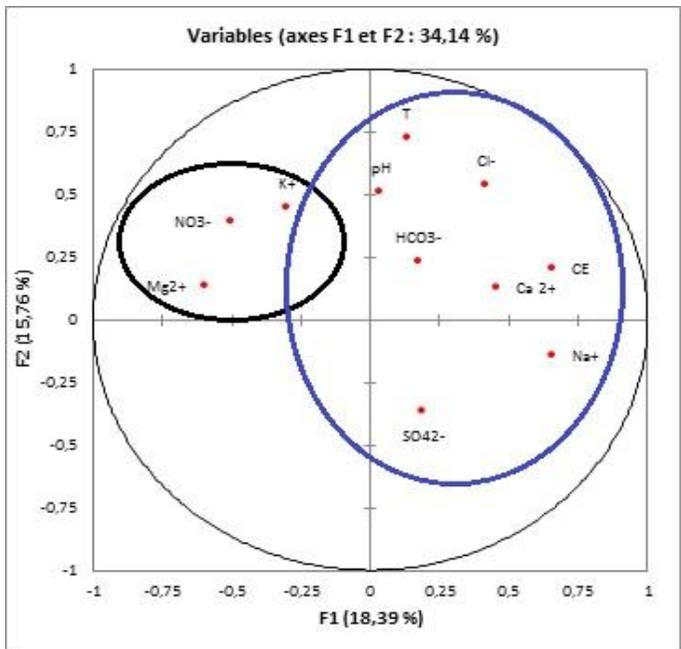
**Tableau 2 : Matrice de corrélation entre les variables**

| Variabiles                    | pH     | CE     | T      | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|-------------------------------|--------|--------|--------|------------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| pH                            | 1      |        |        |                  |                  |                 |                |                 |                               |                               |                              |
| CE                            | 0,098  | 1      |        |                  |                  |                 |                |                 |                               |                               |                              |
| T                             | 0,183  | 0,195  | 1      |                  |                  |                 |                |                 |                               |                               |                              |
| Ca <sup>2+</sup>              | 0,000  | 0,176  | 0,160  | 1                |                  |                 |                |                 |                               |                               |                              |
| Mg <sup>2+</sup>              | 0,288  | -0,345 | -0,105 | -0,142           | 1                |                 |                |                 |                               |                               |                              |
| Na <sup>+</sup>               | 0,051  | 0,247  | -0,049 | 0,242            | -0,190           | 1               |                |                 |                               |                               |                              |
| K <sup>+</sup>                | 0,009  | -0,136 | 0,302  | -0,150           | 0,187            | -0,089          | 1              |                 |                               |                               |                              |
| Cl <sup>-</sup>               | 0,205  | 0,167  | 0,251  | 0,129            | -0,211           | 0,080           | 0,139          | 1               |                               |                               |                              |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | -0,104 | -0,117 | -0,136 | 0,001            | 0,103            | 0,280           | -0,014         | 0,042           | 1                             |                               |                              |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0,158  | 0,057  | -0,018 | -0,038           | 0,276            | 0,236           | -0,071         | 0,294           | 0,087                         | 1                             |                              |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 0,008  | -0,180 | 0,171  | 0,009            | 0,234            | -0,268          | 0,129          | -0,044          | -0,263                        | -0,007                        | 1                            |

L'analyse de cette matrice de corrélation montre une corrélation positive (supérieur à 0) entre :

- Le potentiel d'hydrogène (pH) avec la conductivité électrique (CE), le calcium (Ca<sup>2+</sup>), le magnésium (Mg<sup>2+</sup>), le sodium (Na<sup>+</sup>), le potassium (K<sup>+</sup>), les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) et les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- La conductivité électrique (CE) avec la température (T°C), le calcium (Ca<sup>2+</sup>), le sodium (Na<sup>+</sup>), les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- La température (T°C) avec le calcium (Ca<sup>2+</sup>), le potassium (K<sup>+</sup>), les chlorures (Cl<sup>-</sup>) et les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Le calcium (Ca<sup>2+</sup>) avec le sodium (Na<sup>+</sup>), les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Le magnésium avec le potassium (K<sup>+</sup>), les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Le sodium (Na<sup>+</sup>) avec les chlorures (Cl<sup>-</sup>), les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Le potassium (K<sup>+</sup>) avec les chlorures (Cl<sup>-</sup>), et les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Les chlorures (Cl<sup>-</sup>) avec les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ;
- Les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) avec les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

On se base que sur les deux premiers axes principaux puisqu'ils expriment 34,14 % de la variance totale (**Figure 4**). La **Figure 4** montre que le pôle de minéralisation est constitué par les descripteurs chimiques suivants : pH, Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> qui sont en bonne corrélation avec la CE et la T. On constate cependant une hétérogénéité géochimique dans l'acquisition de la minéralisation car l'examen de l'axe F1 oppose le pôle d'origine soit organique ou anthropique représenté par les nitrates aux autres éléments qui semblent en bonne partie issus de l'interaction eau-roche. L'opposition avec NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> et K<sup>+</sup> par rapport à l'axe 2 semble indiquer cependant une participation non négligeable de la pollution sur l'ensemble des éléments.



**Figure 4 :** Répartition des variables dans le cercle de corrélation suivant le plan factoriel F1-F2

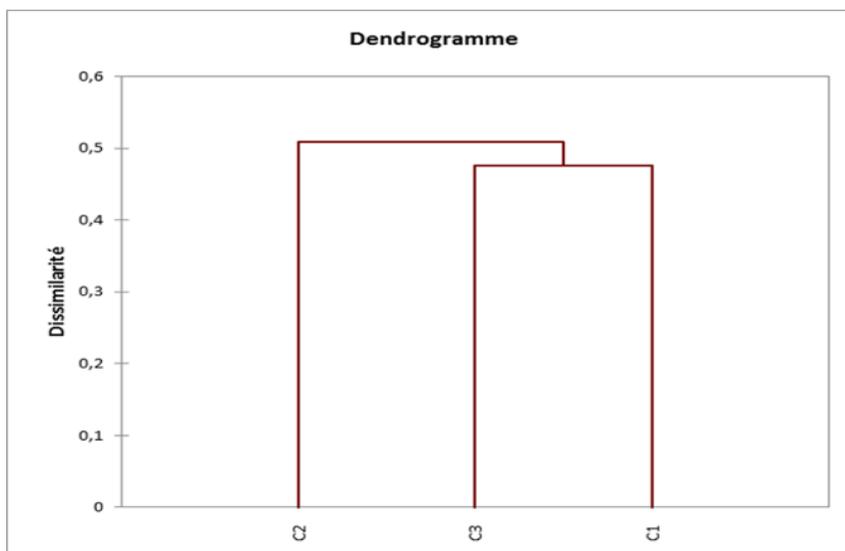
**III-4. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)**

Le **Tableau 3** montre la classification des paramètres physico-chimiques par classe. Il est à noter que la classe C1 est le premier regroupement avec six (06) paramètres. Le deuxième regroupement, c’est la classe C2 qui contient trois (03) paramètres et enfin, le troisième regroupement c’est la classe C3 n’a que deux (02) paramètres.

**Tableau 3 :** Classification des paramètres par classe.

| Classe     | C1   | C2   | C3  |
|------------|--|--|---|
| Paramètres | pH ; T°C ; CE ; Ca <sup>2+</sup> ; Cl <sup>-</sup> ; HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Mg <sup>2+</sup> ; NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ; K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> ; SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |

Le dendrogramme (**Figure 5**) résulte de la classification ascendante hiérarchique (CAH) et met en évidence trois regroupements des variables. Le premier groupe incluant pH, T°C, CE, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> montre une minéralisation liée aux apports superficiels. La seconde famille regroupe Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup> traduit une minéralisation moins élevée dans l’aquifère du précambrien inférieur du bassin supérieur de la Loémé. Le troisième regroupement qui prend en compte Na<sup>+</sup> et SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> montre une minéralisation liée aux apports superficiels d’origine naturelle ou anthropique.



**Figure 5 :** Dendrogramme pour la classification des points d'eau

#### IV - DISCUSSION

Les eaux souterraines du Mayombe montrent une diversité des faciès avec une dominance bicarbonaté calco-magnésien. En région de socle cristallin et cristallophyllien, le facteur le plus déterminant dans l'acquisition des cations est l'hydrolyse des minéraux silicatés. Le contact prolongé de l'eau chargée en  $\text{CO}_2$  avec l'encaissant se traduit par un enrichissement en cations majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et en ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ). L'abondance de ces ions dans les eaux souterraines de socle de l'Afrique est confirmée par plusieurs études [10 - 14]. Néanmoins, ces eaux enregistrent une faible teneur en potassium et sodium du fait de leur adsorption par les argiles de néoformation et les plantes. Selon [13], les eaux circulant dans les roches basiques seront plus riches en alcalino-terreux, alors que celles des roches acides sont à dominance alcaline. A travers les résultats obtenus, on perçoit clairement que la minéralisation des eaux souterraines du Mayombe est intimement liée à la nature des roches rencontrées dans la région. Cela est aussi mieux discriminé par rapport aux caractéristiques des cations et anions. Plus de 90 % des eaux des points captant les roches acides ont un  $\text{pH} < 7$ . Les  $\text{pH}$  des eaux souterraines de la présente étude, à l'exception quelques stations qui ont une tendance basique, sont autour de l'acidité et est conforme avec l'idée de [15] selon laquelle dans la plupart des eaux naturelles, le  $\text{pH}$  est compris habituellement entre 3,90 et 6,08. Ces  $\text{pH}$  sont par ailleurs contraires aux  $\text{pH}$  basiques observés dans les eaux de la cuvette congolaise que rapportent [16]

et [17]. Ces auteurs soutiennent qu'en zone tropicale humide, cette acidité provient principalement de la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de  $\text{CO}_2$  dans les premières couches du sol. Cette hypothèse semble expliquer la distribution du pH dans le Mayombe. En effet les zones à dominance forestière de tendance à pH acide sont riches en matières organiques [18, 19]. Les températures des eaux souterraines dans toutes les stations du Mayombe oscillent entre 25,92 et 26,48°C avec une moyenne de 29,20. Ces résultats sont similaires à d'autres travaux sur les eaux souterraines tels que [20, 21] dans les eaux souterraines du bassin sédimentaire côtier (26°C à 26,80°C) et sont en conformité avec [22] dans le plateau de Mbé et [17], qui rapportent, qu'en zone tropicale humide, la température moyenne des eaux est environ 30°C [23, 24]. Les conductivités sont relativement faibles dans l'ensemble du bassin et oscillent entre 16,33 et 47,17  $\mu\text{S}/\text{Cm}$  et sont en moyenne de 31,88. Les fortes conductivités sont liées aux activités anthropiques qui sont diversifiées et intensifiées dans cette zone (puits domestiques) et y apportent certains ions majeurs. [17] rapporte que les activités anthropiques est un phénomène intervenant dans la minéralisation par les apports superficiels. D'autres auteurs soutiennent d'ailleurs cette hypothèse en relatant que l'impact des activités anthropiques sur la qualité de l'eau constitue un problème majeur d'ordre mondial et fait l'objet de plusieurs études [25 - 32].

Les teneurs en ions majeurs présentent une distribution semblable à celle de la conductivité. Ces ions montrent d'ailleurs une corrélation significative avec la conductivité et subissent tout comme cette dernière, l'influence du contact eau-roche qui constituent les facteurs prépondérants dans l'évolution de la qualité physicochimique des eaux de surface [23, 28 - 30]. Ainsi les deux groupes de paramètres s'opposent diamétralement dans le cercle de corrélation pendant la saison sèche et la saison des pluies. Cette opposition entre les descripteurs de la pollution anthropique et la décomposition des matières organiques est rapportée par certains auteurs tels que [33, 34]. Cette situation s'explique par le fait que les activités anthropiques et biologiques augmentent les teneurs en matières oxydables et certains ions qui utilisent l'Oxygène au cours de leur processus d'oxydation ou de dégradation. L'utilisation de  $\text{HCO}_3^-$  comme indicateur du processus chimique dominant de production d'ions dans les nappes de socle, est à relier avec le mode de sa formation [35]. Les bicarbonates sont produits suite à l'apport du  $\text{CO}_2$  par l'eau d'infiltration, qui par réaction d'hydrolyse des silicates permettent, d'une part la formation du  $\text{HCO}_3^-$ , et d'autre part, l'augmentation du pH en supposant une évolution en milieu fermé. On observe une bonne corrélation entre les ions (**Tableau 2**). Cette tendance à l'augmentation est moins significative avec le sodium. S'il est admis que l'ion  $\text{Mg}^{2+}$  provient en majorité de l'altération des minéraux

silicatés ferromagnésiens [12, 14], une partie non négligeable de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  pourrait avoir une origine indépendante de l'hydrolyse des minéraux [27]. Cela est prouvé par l'ACP avec un regroupement des ions  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Na}^+$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$  opposé à celui de  $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{K}^+$ - $\text{NO}_3^-$ . La présence de deux sous-groupes au niveau de tous les points de la zone d'étude relate respectivement l'affinité des ions (cations et anions) et leurs actions dans la minéralisation de l'eau. Le premier sous-groupe exprime l'influence des roches dans l'acquisition de la minéralisation des eaux qui s'explique en partie par la présence de l'ion  $\text{HCO}_3^-$  [16, 21]. La **Figure 2** discrimine les échantillons ayant des teneurs appréciables de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  qui s'accompagnent avec des teneurs importantes en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . A l'image de toutes les zones humides, la zone d'étude est soumise à une évapotranspiration potentielle importante due à la présence de la forêt, aux températures pendant les deux saisons (saison des pluies et sèche). La **Figure 3** met en évidence ce phénomène et par conséquent, on admet qu'une partie des ions  $\text{Ca}^{2+}$  provient de la dissolution du gypse. S'agissant de l'origine des ions  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{Cl}^-$ , leur corrélation prouve une même origine superficielle différente de celle des sulfates.

## V - CONCLUSION

L'étude de la minéralisation des eaux souterraines des formations cristallines et cristallophylliennes du Mayombe, durant toute la période des campagnes d'échantillonnage, montre que les teneurs des éléments majeurs sont peu variables d'une saison à l'autre. Ces dernières, sont généralement acides, avec un pH moyen de 5,59. La conductivité des eaux souterraines varie entre 16,33  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 47,17  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , avec une moyenne de 31,88  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La qualité des eaux souterraines de ce bassin ne se détériore pas suite à la présence et l'abondance des couches argileuses limitant l'infiltration des eaux pluviales. Les résultats obtenus par l'Analyse en Composantes principales (ACP) indiquent que les variables qui contrôlent la salinisation des eaux sont les cations ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) et les anions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$ ). Les résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) montrent l'existence de trois groupes d'eau avec la prédominance de trois types de faciès à savoir : les eaux chlorurées et sulfatées, calciques et magnésiennes ; les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes ; les eaux chlorurées sodiques et potassiques ou sulfatées sodiques. Les eaux souterraines présentent des teneurs en cations qui varient entre 0,09 et 23,67  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  ; 0,34 et 35,33  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  en anions. Dans le Mayombe, la majeure partie des eaux souterraines étudiées a des teneurs en éléments majeurs inférieures à la norme OMS. Ces eaux souterraines sont propres à la consommation des populations et leur utilisation n'expose pas les populations à des risques sanitaires.

## RÉFÉRENCES

- [1] - M. BLINDA, G. THIVET, Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives. *Sécheresse*, 20 (2009) 9 - 16
- [2] - A. ROUABHIA, Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables Miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod nord-est algérien. Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université d'Annaba, (2006) 189
- [3] - N. MOUKOLO, Hydrogéologie du Congo. Document du BRGM, No 210. éd. BRGM. Orléans, (1992) 128
- [4] - D. MOTT MAC, BCEOM, SOGREA, ORSTOM, Evaluation hydrologique de l'Afrique subsaharienne, pays de l'Afrique de l'Ouest. Rapport du pays : Congo. Paris, (1991) 30 - 31; 33 - 34; 60 - 62; 74 - 75
- [5] - P. DADET, Notice explicative de la carte géologique de la République du Congo, Brazzaville au 1/500.000, mémoire du BRGM n°70, Congo - Brazzaville, *ORSTOM*, (1969) 12 - 24
- [6] - M. J. SAMBA-KIMBATA, Rythme bioclimatique et comportement phénologique de la végétation en République du Congo. Ann. Univ. Marien Ngouabi, (2002) 81 - 92
- [7] - V. CLOUTIER; R. LEFEBVRE; R.THERRIEN; M.M. SAVARD, Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353 (2008) 294 - 313
- [8] - S. M. YIDANA, D. OPHORI, B. BANOENG -YAKUBOB, A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 86 (2008) 80 - 87
- [9] - M. TEMPL, P. FILZMOSER, C. REIMANN, Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23 (2008) 2198 - 2213
- [10] - M. S. OGA, T. LASM, T. K. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI, F. GNAMBA, Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fractures : Cas de la Région de Tiassalé en Côte D'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 31 (1) (2009) 72 - 87. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
- [11] - T. LASM, O. DE LASME, M. S. OGA, M. TA YOUAN, D. BAKA, F. KOUAME, T. K. YAO, Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San- Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 5 (2) (2011) 642 - 662. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
- [12] - K. E. AHOUSSE, T. M. YOUAN, S. LOKO, M. G. ADJA, L. LASM, J. P. JOURDA, Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou. *Afriq. Sci.*, 08 (3) (2012) 51 - 68. <http://www.afriquescience.info/document.php?id=2565>
- [13] - M. S. ABDOU BABAYE, Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako Niger). PhD Thèse, Université Liège, (2012) 235

- [14] - M. S. ABDOU BABAYE, I. SANDAO, M. B. SALEY, I. WAGANI, B. OUSMANE, Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10 (6) (2016) 2728 - 2743
- [15] - L. MATINI, J. M. MOUTOU, M. S. KONGO-MANTONO, Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique SCIENCE*, 05 (1) (2009) 82 - 98
- [16] - U. G. MBILOU, M. TCHOUMOU, M. NGOUALA MABONZO, Étude de la composition physico-chimique des eaux du bassin de la cuvette congolaise, République du Congo. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 28 (2016) 1 - 12
- [17] - M. NGOUALA MABONZO, Cartographie de l'hydrographie sous terraines du bassin versant de la Loémé par les Système d'Information Géographique (S.I.G). Thèse de doctorat, université Marien Ngouabi, (2016) 197
- [18] - A. EL OUALI LALAMI, M. MERZOUKI, O. EL HILLALI, S. MANIAR, S. IBNSOUDA KORAICHI, Pollution des eaux de surface de la ville de FES au Maroc : typologie, origine et conséquences, *Larhyss journal*, N° 9 (2010) 55 - 72
- [19] - A. EL OUALI LALAMI, F. EL AKHAL, S. BERRADA, L. BENNANI, N. RAISS, S. MANIAR, Evaluation de la qualité hygiénique des eaux de puits et des sources par l'utilisation d'une analyse en composante principale : une étude de cas de la région de Fès (Maroc), *Jour. Mater Environnemental Sciences*, (2014) 2334 - 2344
- [20] - G. D. MOUKANDI - NKAYA, Etude hydrogéologique, hydrochimique *in situ* et modélisation hydrodynamique du système aquifère du bassin sédimentaire de la région de Pointe - Noire. Thèse de doctorat. Université Marien Ngouabi, (2012) 132
- [21] - U. G. MBILOU, M. TCHOUMOU, M. NGOUALA MABONZO, J. BALOUNGUIDI, Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des eaux souterraines dans le système d'aquifères multi couche de la région de Pointe-Noire en République du Congo. *Larhyss Journal*, N°28 (2016) 257 - 273
- [22] - H. OBAMI ONDON, U. G. MBILOU, D. NKOUNKOU TOMODIATOUNGA, M. NGOUALA MABONZO, R. GENTIL ELENGA, B. MABIALA, Physicochemical Characterization of Water of the Plateau of Mbe in Pool-North in Republic of Congo Brazzaville. *American Journal of Environmental Protection*, 7 (3) (2018) 40 - 54
- [23] - D. BOUBA, Technique de Conservation de l'eau potable dans le Nord-Cameroun : cas de la ville de Maroua. Mémoire de DIPES II, (2010) 13
- [24] - S. G. EBLIN, A. P. SOMBO, G. SORO, N. AKA, O. KAMBIRE, N. SORO, Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adieke, Cote d'Ivoire. *Journal of applied biosciences*, 75 (2014) 6259 - 6271
- [25] - S. BRICHA, K. OUNINE, S. OULKHEIR, N. EL HALOUI, B. ATTARASSI, Étude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE*, 03 (3) (2007) 391 - 404
- [26] - J. EL ASSLOUJ, S. KHOLTEI, N. EL AMRANI-PAAZA, A. HILALI, Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 20, N° 3 (2007) 309 - 321

- [27] - A. SHAHBAZI, A. ESMAEILI-SARI, Groundwater Quality Assessment in North of Iran: A Case Study of the Mazandaran Province. *World Applied Sciences Journal* 5 (Special Issue for Environment), (2009) 92 - 97
- [28] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, N. SORO, J. BIEMI, Etude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (4) (2012a) 1854 - 1873
- [29] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, N. SORO, J. BIEMI, Caractérisation Physico- Chimique et Bactériologique des Ressources en eau des Localités Situées Aux Abords de la lagune Ébrié dans la commune de Marcory (District d'Abidjan, Côte Ivoire) : cas du village d'Abia Koumassi. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 89, N° 3 (2012b) 359 - 383
- [30] - G. E. AKE, B. H. KOUADIO, M. G. ADJA, J. B. ETTIEN, K. R. EFFEBI, J. BIEMI, Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Vol. 6, (2012). <http://physiogeog.revues.org>
- [31] - A. ABOUDI, H. TABYAOUI, F. EL HAMICHI, Etude de la qualité physicochimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou-Maroc, *European Scientific Journal*, N° 23 (2014) 84 - 94
- [32] - E. ABBA, H. NASSALI, M. BENABID, H. EL IBAOUI, L. CHILASSE, Approche physicochimique des eaux du lac dayetAoua (Maroc) *J. appl. Biosc.*, 58 (2012) 4262 - 4270
- [33] - G. KHALAF, K. SLIM, C. ABI-GHANEM, K. NAKHLE et M. FAKHRI, Caractérisation et corrélation des paramètres biotiques et abiotiques des eaux du nahr el bared. *Lebanese Science Journal*, Vol. 10, N°1 (2009)
- [34] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU, M. VAN CLOOSTER, Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued moulouya (maroc oriental), *Larhyss Journal*, N° 09 (2011) 149 - 169
- [35] - A. M. KOUASSI, K. A. YAO, A. Y. AKÉ, J. BIEMI, Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, N°5 (2011) 2155 - 2169