

## **Variations saisonnières des paramètres physico-chimiques des eaux de surface du bassin versant de la Loutété et ses environs, Sud-est du Congo**

**Gilbert BASSAKOUAHOU<sup>1\*</sup>, Médard NGOUALA MABONZO<sup>2</sup> et Urbain Gampio MBILOU<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Université Marien Ngouabi, Faculté des Sciences et Techniques, Laboratoire de Géosciences, BP 69-Brazzaville, République du Congo*

<sup>2</sup> *Université Marien Ngouabi, Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines, Laboratoire de Géographie physique, BP 69 Brazzaville, République du Congo*

(Reçu le 29 Mai 2024 ; Accepté le 08 Juillet 2024)

---

\* Correspondance, courriel : [bassakouahougilbrt@gmail.com](mailto:bassakouahougilbrt@gmail.com)

### **Résumé**

Le bassin versant de la Loutété est doté d'un réseau hydrographique assez dense. Dans ce bassin versant, notamment dans la zone de Mfouati, les activités minières se développent à ciel ouvert. Les éléments extraits sont les métaux lourds. La population riveraine utilise l'eau de surface pour les besoins domestiques et agropastoraux. L'objectif de la présente étude est de caractériser les variations saisonnières des paramètres physicochimiques des eaux du bassin versant de la Loutété. Quatre vingt seize échantillons ont été étudiés sur sept (7) points au cours de quatre saisons de l'année hydrologique. Les résultats des analyses, ont été traités à l'aide des logiciel Diagramme, et par le logiciel XLSTAT. Les eaux analysées ont des pH légèrement basiques compris (7,8-8,84) durant les quatre saisons de l'année. En saison humide, certains éléments comme le Plomb (0,03mg/L), le Fer (0,31mg/L) et l'Aluminium (0,9 mg/L) ont des teneurs légèrement en hausse, par rapport aux normes de potabilité de l'OMS pour les eaux de consommation. Le diagramme de piper fait observer deux faciès, le faciès bicarbonatée calcique (75 %) et le faciès chloruré-calcique (25 %). L'Analyse en Composantes Principales a permis d'identifier deux mécanismes de minéralisation des eaux dans ce bassin versant (altération chimique des roches carbonatées et le pluviolessivage des sols calo-magnésiens et ferrallitiques). L'augmentation des teneurs en Plomb, Fer et Aluminium en saison humide est due à l'altération des roches. Ces éléments constituent un danger pour la santé de la population et des écosystèmes aquatiques du bassin versant de la Loutété.

**Mots-clés :** *Congo, Loutété, Mfouati, bassin versant, variations saisonnières, paramètres physico-chimiques.*

### **Abstract**

**Seasonal variations in the physicochemical parameters of surface waters of the Loutété watershed and its surroundings, South-eastern Congo**

The Loutété watershed is characterized by a relatively dense hydrographic network. In this watershed, particularly in the Mfouati area, open-pit mining activities are developing. The extracted elements are heavy metals. The local population uses surface water for domestic and agropastoral needs. The objective of the present study is to characterize the seasonal variations of the physicochemical parameters of the waters in

the Loutété watershed. Four hundred and ninety-six samples were studied at seven points over four seasons of the hydrological year. The analysis results were processed using the Diagramme software and the XLSTAT software. The analyzed waters have slightly basic pH values (7.8-8.84) throughout the four seasons of the year. During the wet season, certain elements such as Lead (0.03mg/L), Iron (0.31mg/L), and Aluminum (0.9 mg/L) have slightly elevated levels compared to WHO drinking water standards. The Piper diagram shows two facies, the calcium bicarbonate facies (75 %) and the chloride-calcium facies (25 %). Principal Component Analysis identified two mechanisms of water mineralization in this watershed (chemical weathering of carbonate rocks and rainwater leaching of calcareous-magnesian and ferralitic soils). The increase in Lead, Iron, and Aluminum levels during the wet season is due to rock weathering. These elements pose a danger to the health of the population and the aquatic ecosystems of the Loutété watershed.

**Keywords :** *Congo, Loutété, Mfouati, watershed, seasonal variations, physicochemical parameters.*

## 1. Introduction

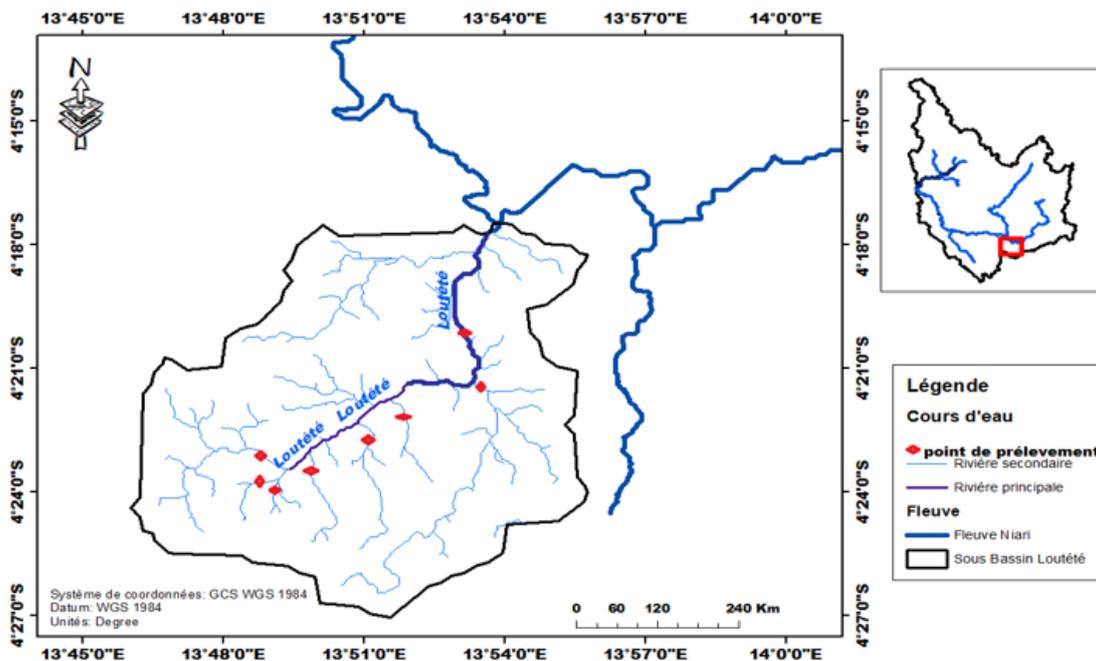
Depuis les périodes près coloniales, le sous-sol du bassin versant de la Loutété connaît une intense activité minière basée sur l'extraction des métaux lourds notamment plomb (Pb), cuivre (Cu) et Zinc (Zn) [1]. Ces activités sont menées à ciel ouvert. La population de la sous-préfecture de Mfouati, par manque des structures de captage des eaux souterraines, utilise directement l'eau de surface pour les activités domestiques et agropastorales [2]. Le captage des eaux souterraines est compliqué par la nature des formations géologique et de relief très accidentés. Les activités agropastorales se développent le long du réseau hydrographique pour la facilité de captage des eaux. En outre, les eaux drainent trois types des sols : sols calco-magnésimorphes, sols ferralitiques, et les sols hydromorphes [3]. Cependant, les sols et les sites d'extraction des métaux lourds étant exposés, les eaux de ruissellement pendant les saisons des humides peuvent néanmoins mobiliser les éléments chimiques et les transférer vers les cours d'eau, entraînant ainsi une altération de la qualité des eaux de surface, voire des eaux souterraines. Toutefois, en dépit de toutes ces activités anthropiques et la nature du sol susceptible de dégrader la qualité de l'eau, aucune étude de recherche spécifique n'a été menée pour apprécier la qualité des eaux du bassin versant de la Loutété, ni sur l'évaluation de l'impact pouvant résulter de l'anthropisme, et de transfert des éléments chimiques entraînés par les ruissèlements et de l'augmentation de niveau d'eau au cours des pluies. Cette problématique a suscité l'intérêt de mener cette étude dans le but d'évaluer l'impact des variations saisonnières sur les paramètres chimiques des eaux de surface du bassin versant de la Loutété. L'évaluation la qualité des eaux par comparaison des paramètres physico-chimiques à différente saison de l'année permettra de bien déceler des éventuels changements en fonction de la période saisonnière [4]. L'objectif visé par cette étude est de caractériser les variations saisonnières des paramètres physicochimiques des eaux du bassin versant de la Loutété. Pour ce faire, nous procéderons à la quantification de divers éléments chimiques dissous dans l'eau, à l'analyse de leur origine, à la détermination des faciès chimiques, ainsi qu'à l'évaluation de la potabilité des eaux et de leur aptitude à la consommation.

## 2. Matériel et méthodes

### 2-1. Matériel

#### 2-1-1. Caractéristiques géographiques du bassin versant de la Loutété

Le bassin versant de la Loutété, se situe dans le district de Mfouati au sud-est de la République du Congo entre les coordonnées géographiques 4°25' et 4°15' de latitude Sud et 13°53' et 13°45' de longitude Est (*Figure 1*). Il couvre le 3/4 de la totalité du bassin versant et draine une superficie de 68,403 km<sup>2</sup>.



**Figure 1 :** Localisation des points de prélèvements (source : GeoSig Consulting cg)

Du point de vue géologique, le bassin versant de la Loutété est sur des formations sédimentaires Précambriennes anciennes qui ne sont autres que les formations schisto-calcaires et schistogréseuses [3, 5]. Ses cours d'eau coulent sur trois types de sols : sols calco-magnésimorphes, sols ferralitiques, et les sols hydromorphes [6]. La végétation couvrant le bassin versant est pareille que celle de la vallée du Niari ; dominée essentiellement par la savane arbustive [7]. Du point de vue climatique, [8], ce bassin versant se situe dans la partie sud de la République du Congo, caractérisée par un climat tropical humide. Ce climat présente un régime de précipitations distinct, avec deux saisons fortement contrastées : une saison des pluies s'étendant d'octobre à mai, marquée par un fléchissement des précipitations en janvier ou février, et une saison sèche presque totalement dépourvue de pluies le reste de l'année, pouvant durer jusqu'à cinq mois, de la mi-mai à la mi-octobre. Les précipitations interannuelles sont relativement faibles, comprises entre 800 et 1800 mm.

### 2-2. Méthodes

Quatre campagnes de prélèvement d'échantillons d'eau ont été menées dans le bassin versant sur huit (8) sites. Les campagnes de prélèvement ce sont effectués au cours des quatre saisons que composent l'année hydrologique (grande saison de pluie : d'Octobre à décembre, petite saison sèche ou période de fléchissement des pluies : janvier à février, petite saison de pluie : de mars-mai et la grande saison sèche : juin-septembre), entre janvier 2019 à décembre 2019, soit une campagne par saison. Au total 96 échantillons ont été analysés.

Les points de prélèvement ont été localisés (*Figure 1*) sur le terrain à l'aide du GPS. Les eaux ont été prélevées à l'aide des flacons en polyesters de capacité 1,5 litre puis transportés dans une glacière et conservés à une température d'environ 4°C. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de l'Institut de Recherche des Sciences Exactes et Naturelles (l'IRSEN). Les paramètres physicochimiques analysés sont : la température, le pH, le TDS et CE ont été mesurés in situ à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA HI89300. La turbidité était mesurée au laboratoire les éléments analysés au laboratoire ne sont autres que les éléments chimiques,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{F}^-$ , l'alcalinité et certains métaux lourds à savoir :  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Cr}^-$ ,  $\text{Al}^{3+}$ . Les valeurs des éléments physiques et chimiques mesurés ont été ensuite comparés aux valeurs guide de l'Organisation Mondiale de la Santé [9]. La classification en faciès hydrochimiques des eaux a été réalisée à l'aide du Diagramme de Piper. Les analyses statistiques des données physicochimiques ont été réalisées à partir de l'analyse en composantes principales (ACP). La fiabilité des résultats des analyses a été vérifiée à l'aide de la balance ionique.

### 3. Résultats

#### 3-1. Analyse des paramètres physiques

Les paramètres physiques mesurés in-situ dans les eaux de surface du bassin versant ne montrent pas tous des variations saisonnières notables (*Figure 2*). Les valeurs de la température mesurées varient entre 25°C et 28°C avec une moyenne de 26,5°C. Les pH des eaux étudiées ont tendance d'être basique avec des valeurs oscillantes entre 7,8 et 8,84 avec une moyenne de 8,3. Les variations observées ne sont saisonnières mais plutôt de la nature des formations drainées par les eaux. Les rivières drainant les formations schisto-gréseuses ont une moyenne des pH de  $7,9 \pm 0,72$  unité pH, par contre les eaux qui drainent les formations du schisto-calcaire ont une moyenne des pH de  $8,84 \pm 0,64$  unité pH. Cette évolution des pH traduit l'influence des terrains et des sols drainés par les eaux. Ces valeurs de pH sont dans la gamme des pH fixées par l'OMS. La conductivité de l'ensemble des eaux est acceptable, à l'exception de la rivière Mandzassi qui a des valeurs élevées qui oscillent entre 30  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 441,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec une moyenne de 411  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Le reste des rivières ont une conductivité électrique qui oscille entre 8,37  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Silowa) et 90  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (chapelle). Les faibles valeurs de la conductivité traduisent la faible minéralisation des eaux de l'ensemble du bassin versant de la Loutété. La turbidité et les solides dissous totaux (TDS) montrent une évolution saisonnière similaire avec des valeurs généralement faibles dans l'ensemble des eaux du bassin versant, à l'exception du site de Madzansi qui présente des variations importantes de TDS, allant d'un minimum de 12 mg/L à un maximum de 215 mg/L, avec une moyenne de 203,4 mg/L. Dans les autres sites, les TDS varient entre 1 et 52 mg/L. La turbidité varie entre 0,8 et 11 NTU. Les valeurs élevées de TDS et de turbidité sont mesurées pendant les périodes de fortes précipitations.

#### 3-2. Analyse des paramètres chimiques

La figure 3 illustre les variations saisonnières des paramètres chimiques analysés. Dans tout le bassin versant, seul le site de Mandzassi qui montre des variations saisonnières assez marquées des paramètres chimiques. Pour les cations majeurs, le  $\text{Ca}^{2+}$  montre des valeurs plus élevées. Les teneurs varient entre 0,28 mg/L (janvier) et 58,8 mg/L (mai) dans les eaux de Mandzassi et le reste des eaux ont des teneurs qui varient entre 1 mg/L et 52 mg/L. Les autres cations montrent des teneurs faibles, les ions  $\text{Na}^+$  (0,48 à 26,54 mg/L) ; le  $\text{Mg}^{2+}$  (0,16 à 16,9 mg/L) et en dernier lieu viennent les ions  $\text{K}^+$  avec des valeurs de 0,11 et 12 mg/L. Les anions majeurs ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{NO}_3^-$ ), les ions  $\text{HCO}_3^-$  prédominent avec des valeurs comprises entre 3,41 et 179,43 mg/L, les ions  $\text{Cl}^-$  (0,9 et 46,45 mg/L), les  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,76 et 35,32 mg/L) en dernier lieu viennent les ions  $\text{NO}_3^-$  (0,17 et 16,61 mg/L). Les concentrations des anions mineurs  $\text{PO}_4^{3-}$  et  $\text{F}^-$  dans l'ensemble des eaux du bassin versant de la Loutété sont très faibles. Pour les ions  $\text{PO}_4^{3-}$ , les teneurs varient entre 0,1 et 0,85 mg/L,

tandis que pour les ions  $F^-$ , elles oscillent entre 0,1 et 1,49 mg/L. Cependant, les valeurs de ces paramètres chimiques dans l'ensemble des eaux étudiées restent en dessous des limites fixées par l'OMS. Autre élément chimique analysé est la silice ( $SiO_2$ ), les teneurs de ce paramètre varient entre 5,16 et 16,9 mg/L. Cette silice observée dans les eaux pourrait provenir du lessivage des roches et sols drainés par les eaux du bassin versant.

### 3-3. Analyse de métaux lourds

Notre étude s'est limitée à la détermination de sept (7) métaux lourds (Cd, Cr, Pb, Fe, Zn, Mn et As). Les eaux étudiées dans la zone d'étude, montrent des teneurs très faibles en métaux lourds (*Tableau 1*) par rapport aux normes limite de l'OMS. Les autres éléments comme le Cd, As et Mn sont à des teneurs très négligeables dans l'ordre de 0,001 mg /L. Par contre d'autres sont enregistrés avec des teneurs légèrement supérieures aux valeurs limites de l'OMS, notamment le Fe, Al et Pb (OMS : 0.01 et 0,2 mg/L). Les teneurs enregistrées dans l'ensemble des points échantillonnés oscillent respectivement de 0,01 et 0,31 mg/L de 0,01 à 0,9 mg/L et 0,01 à 0.03 mg/L. Les teneurs supérieures aux normes de l'OMS sont enregistrées au niveau de la Loutété et Mandzassi. Ces teneurs certes légèrement supérieures aux normes limites de l'OMS, leur détection dans les eaux présente déjà un danger écologique et sanitaire [10].

### 3-4. Classification chimique des eaux

L'analyse des résultats des éléments chimiques (cations et anions) par la méthode hydrochimique qui utilise le diagramme triangulaire de piper (Figure.4) fait ressortir un faciès prédominant en majorité bicarbonatée calcique (75 %). Cependant, un deuxième faciès chloruré sulfaté calcique (25 %) est observé aux mois de janvier, septembre et décembre. Le deuxième faciès est principalement représenté par les eaux de Moukanda, qui se distinguent des autres points échantillonnés. La campagne de janvier montre trois points présentant ce deuxième faciès : Moukanda, Silowa et Malouénda. Cela illustre clairement les variations saisonnières des faciès hydrochimiques dans le bassin versant de la Loutété [11].

### 3-5. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse statistique en composantes principales a été effectuée sur 25 paramètres dans l'ensemble des 96 échantillons. Les résultats statistiques sont consignés dans le tableau 1. Les valeurs propres et pourcentages des variances sont présentés dans le tableau 2 et le *Tableau 3* pour la matrice de corrélation entre les différentes variables pris deux à deux. Le tableau 1 synthétisant les résultats de l'analyse statistique des éléments physicochimiques montre que près de la moitié des Ecart-types est supérieure aux valeurs moyennes de différents paramètres. Les majeures parties des moyennes des paramètres des éléments mesurés sont inférieurs aux valeurs guides de l'OMS. Le tableau 2 montre les valeurs propres des différentes variables. Il en ressort de l'analyse de ce tableau que plus de 37 % de variable participent à la constitution de l'axe factoriel F1, dont la majorité des paramètres. L'axe factoriel F2 est composé de 18 % des variables ( $F^-$ ,  $SiO_2$  et pH). Ces trois variables indiquent une origine différente de celles qui contribuent à la formation du facteur F1. Le groupement des variables dans les deux axes (F1 et F2) est plus de 50 % ce qui donne des informations suffisantes pour déterminer les origines de la minéralisation des eaux étudiées. La matrice de corrélation (tableau 3) montre des bonnes corrélations des variables prises deux à deux. Entre CE et les éléments  $Na^+$  (0,61), le  $Fe^{2+}$  (0,68), le  $Pb^{2+}$  (0,65) le  $HCO_3^-$  (0,76), le  $Cl^-$  (0,86), le TDS (0,95), le  $Ca^{2+}$  et les éléments  $Mg^{2+}$  (0,76), le  $Na^+$ ,  $K^+$  (0,65),  $SO_4^{2-}$  et les éléments  $Mg^{2+}$  (0,71), le  $Ca^{2+}$  (0,60), TDS et les élément  $Na^+$  (0,64), le  $HCO_3^-$  (0,83), le  $Cl^-$  (0,91), le  $NO_3^-$  (0,62), le  $PO_4^{3-}$  (0,74). Certains éléments comme  $F^-$ , pH et la  $SiO_2$  ne présentent aucune corrélation avec les autres paramètres. Les bonnes corrélations illustrent les liens existant entre différentes variables et leur évolution dans le milieu.

### 3-6. Analyse de l'espace des variables et individus des plans factoriels F1-F2

La **Figure 5** résume la projection des variables dans les facteurs F1 et F2. Le facteur F1 regroupe la quasi-totalité des variables (CE, TDS, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pH, F<sup>-</sup>, Turb, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Cr<sup>-</sup>). Le groupement de ces éléments autour de l'axe F1 illustre une origine commune et un mécanisme de minéralisation identique. Cette origine et mécanisme commune est traduite par la forte corrélation entre ces éléments. Le facteur F2, en revanche, ne regroupe que trois éléments (F- pH et SiO<sub>2</sub>). L'absence de corrélation de ces éléments avec les autres suggère une source de provenance différente. La présence de la silice dans ce groupe prouve une minéralisation par pluviolavage des sols.

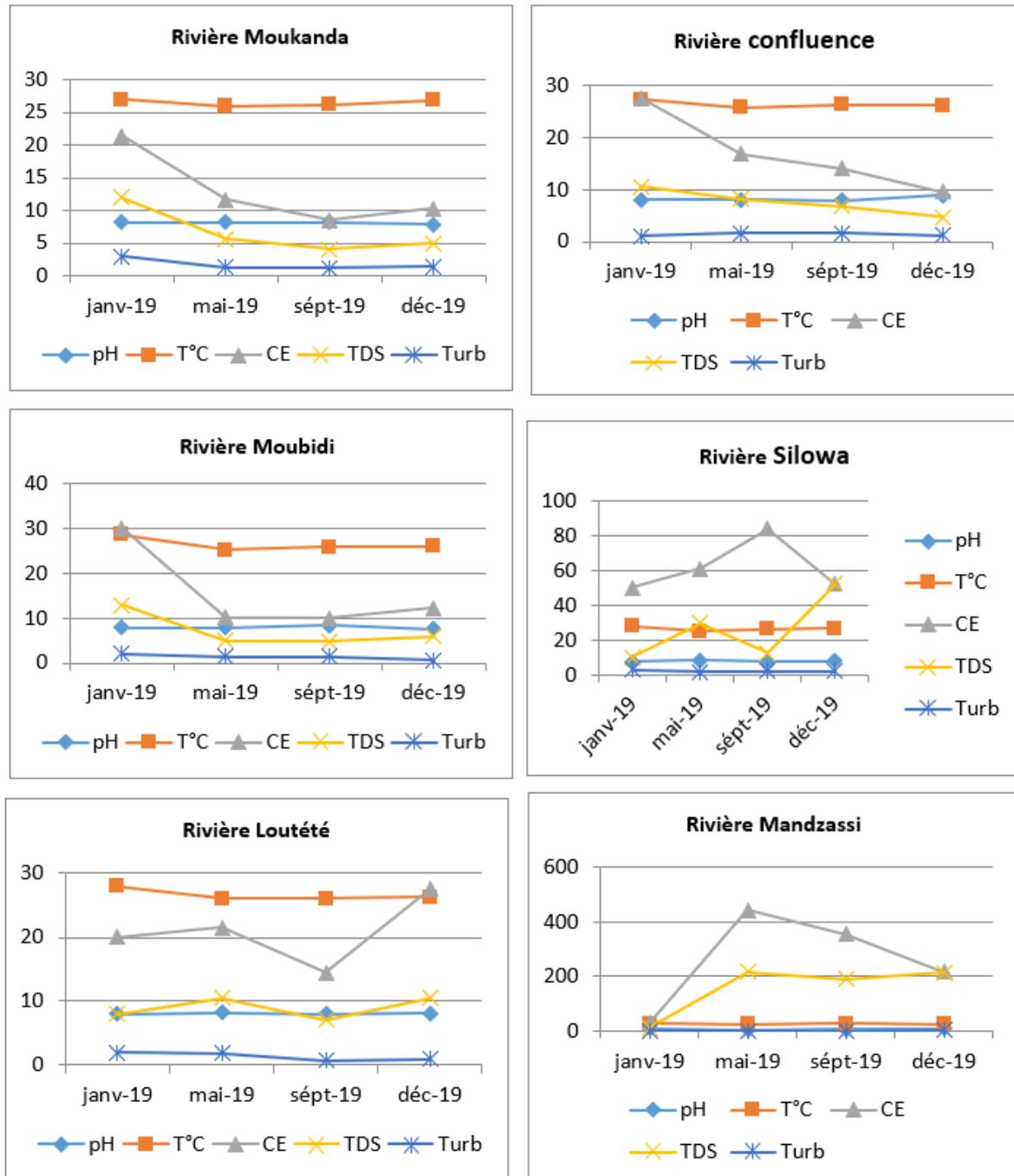


Figure 2 : Variations saisonnières des paramètres physiques

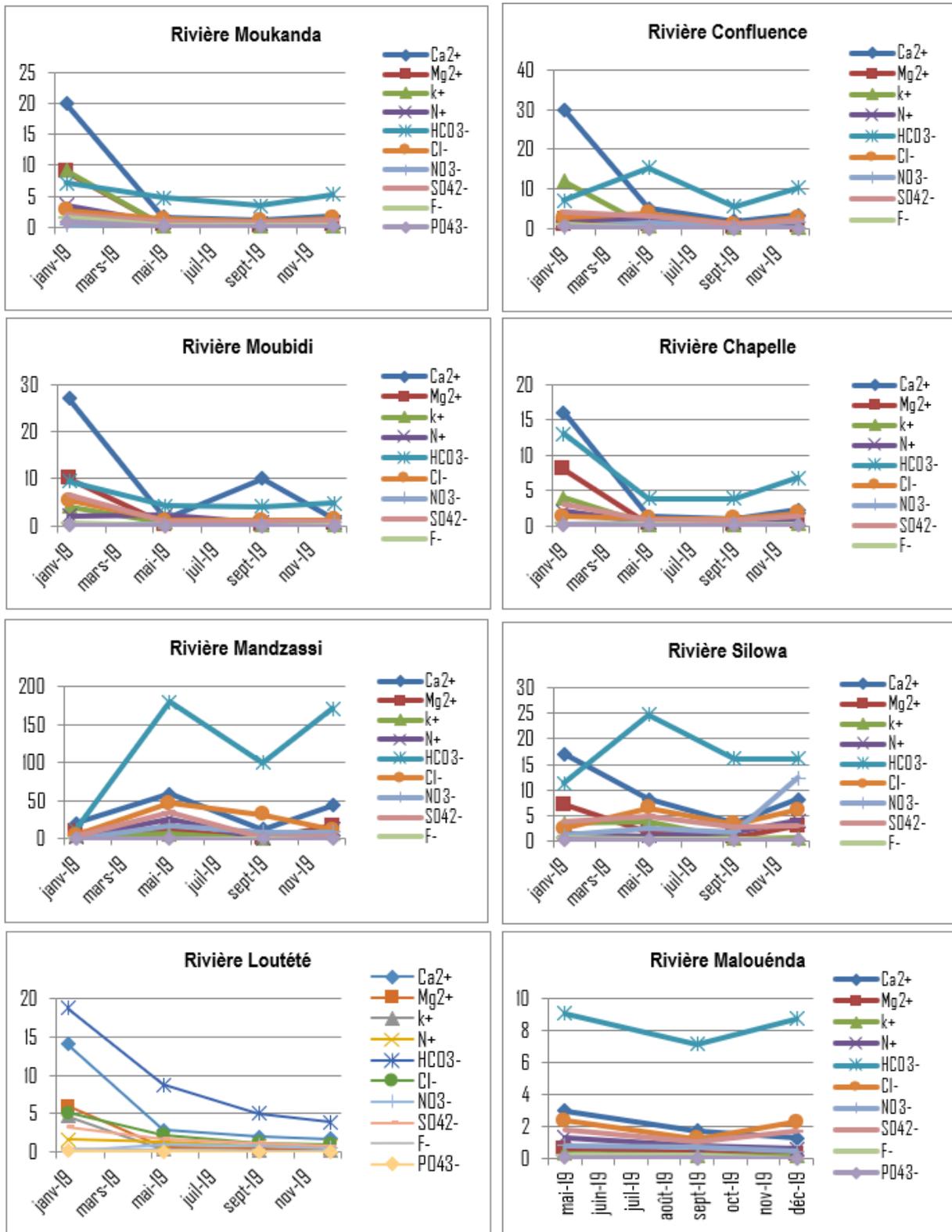


Figure 3 : Variations saisonnières des paramètres chimiques

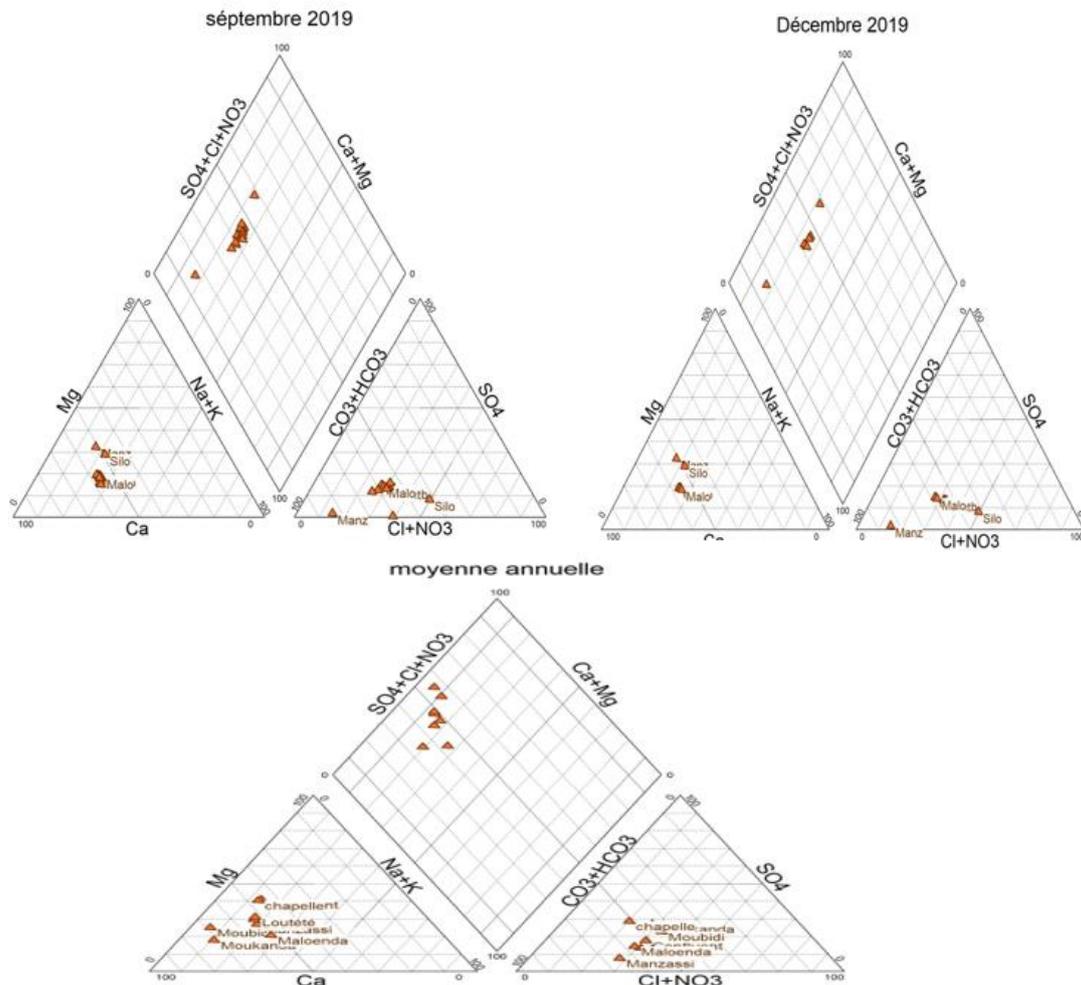


Figure 4 : Diagramme de Piper des eaux du bassin versant de la Loutété

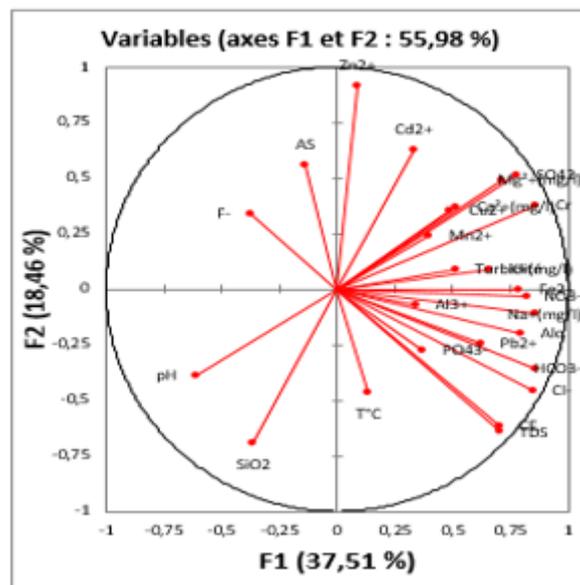


Figure 5 : Espace des variables des plans factoriels a) F1 x F2

**Tableau 1 : Valeurs propres et pourcentage des variances exprimé**

	F1	F2	F3
Valeur propre	9,754	4,800	3,412
Variabilité (%)	37,514	18,461	13,124
% cumulé	37,514	55,976	69,100

**Tableau 2 : Analyse statistique descriptive**

Variables	Unité de mesure	Valeurs guide OMS	Nombre d'échantillons	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Ph		6,5-8,5	8	7,560	8,190	7,920	0,239
T°C	°C		8	25,900	26,700	26,400	0,245
CE	µS/cm	400	8	9,700	49,093	260,550	85,783
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	ND	8	1,980	31,100	11,993	9,386
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	ND	8	0,470	9,510	3,666	2,775
Na <sup>+</sup>	mg/L	200	8	0,990	10,260	2,506	3,178
K <sup>+</sup>	mg/L	12	8	0,260	4,660	1,934	1,434
Al <sup>3+</sup>	mg/L	0,2	8	0,000	35,000	4,452	12,344
F <sup>-</sup>	mg/L	1,5	8	0,140	1,080	0,386	0,298
Cu <sup>2+</sup>	mg/L	2	8	0,012	0,050	0,033	0,013
Fe <sup>2+</sup>	mg/L	0,2	8	0,005	0,320	0,119	0,136
Pb <sup>2+</sup>	mg/L	0,01	8	0,001	0,015	0,009	0,005
Cd <sup>2+</sup>	mg/L	0,003	8	0,001	0,003	0,001	0,001
Mn <sup>2+</sup>	mg/L	0,5	8	0,002	3,000	0,396	1,052
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	ND	8	5,120	115,380	22,278	37,826
Cl <sup>-</sup>	mg/L	250	8	1,110	23,700	5,069	7,594
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	250	8	1,740	10,610	3,478	2,941
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	50	8	0,470	8,840	2,174	2,990
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	5	8	0,030	0,460	0,130	0,150
Zn <sup>2+</sup>	mg/L	3	8	0,000	0,020	0,009	0,008
SiO <sub>2</sub>	mg/L	ND	8	7,680	14,610	10,834	2,165
AS	mg/L	0,001	8	0,000	0,001	0,000	0,000
Turbidité	NTU	0	8	1,350	58,270	8,824	19,984
TDS	mg/L	0	8	6,130	110,400	22,661	35,804
Cr	mg/L	0	8	0,010	0,045	0,022	0,012

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables prises deux à deux

Varia	pH	T°C	CE	Ca2+	Mg+	Na+	K+	Al3+	F-	Cu2+	Fe2+	Pb2+	Cd2+	Mn2+	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	PO43-	Alc.	Zn2+	SiO2	Turb	TDS	Cr	
pH	1																									
T°C	0,01	1																								
CE	-0,37	0,50	1																							
Ca2+	-0,38	0,43	0,23	1																						
Mg2+	-0,42	-0,06	0,21	0,76	1																					
Na+	-0,31	0,27	0,61	0,64	0,61	1																				
K+	-0,08	0,35	0,25	0,65	0,59	0,81	1																			
Al3+	-0,02	-0,08	0,26	0,02	0,26	0,31	0,16	1																		
F-	0,26	-0,65	-0,74	-0,5	-0,33	-0,33	-0,08	-0,26	1																	
Cu2+	-0,61	-0,15	0,33	0,40	0,66	0,21	-0,06	0,5	-0,6	1																
Fe2+	-0,68	0,27	0,68	0,40	0,51	0,56	0,35	0,63	-0,6	0,71	1															
Pb2+	-0,67	0,34	0,65	0,02	0,01	0,36	0,23	0,14	-0,3	0,16	0,70	1														
Cd2+	-0,15	-0,63	-0,25	0,17	0,72	0,12	0,2	0,35	0,18	0,55	0,20	-0,24	1													
Mn2+	-0,52	0,54	0,15	0,51	0,20	0,35	0,58	-0,08	-0,1	-0,1	0,45	0,62	-0,2	1												
HCO3-	-0,28	0,04	0,76	0,11	0,47	0,69	0,47	0,40	-0,3	0,33	0,63	0,54	0,3	0,03	1											
Cl-	-0,2	0,26	0,85	0,33	0,5	0,83	0,55	0,38	-0,5	0,31	0,61	0,43	0,12	0,04	0,92	1										
SO42-	-0,73	-0,37	0,19	0,40	0,71	0,57	0,44	0,09	0,1	0,48	0,49	0,38	0,60	0,31	0,52	0,41	1									
NO3-	-0,42	-0,29	0,47	0,04	0,5	0,59	0,43	0,19	0,05	0,26	0,46	0,50	0,47	0,07	0,88	0,71	0,78	1								
PO43-	0,09	0,08	0,28	0,19	0,04	0,71	0,52	0,38	0,07	-0,2	0,16	0,10	-0,18	0,09	0,31	0,48	0,16	0,24	1							
Alc.	-0,34	-0,22	0,57	0,02	0,42	0,61	0,4	0,11	-0,2	0,19	0,39	0,47	0,35	-0,02	0,90	0,79	0,69	0,98	0,29	1						
Zn2+	-0,51	-0,15	-0,4	0,53	0,57	-0,1	0,11	-0,08	-0,1	0,52	0,19	-0,1	0,52	0,39	-0,3	-0,4	0,44	-0,1	-0,5	0,25	1					
SiO2	0,41	0,09	0,28	-0,55	-0,48	-0,41	-0,64	0,21	-0,4	0,05	-0,08	-0,13	-0,3	-0,66	0,04	0,07	-0,67	-0,3	-0,2	0,14	-0,6	1				
Turb	-0,7	-0,18	0,28	-0,12	0,07	0,19	0,1	-0,26	0,21	0,05	0,311	0,74	0,05	0,39	0,42	0,21	0,66	0,69	-0,1	0,64	0,07	-0,38	1			
TDS	-0,28	0,33	0,95	0,14	0,21	0,64	0,26	0,14	-0,6	0,21	0,51	0,55	-0,18	0,02	0,83	0,91	0,26	0,62	0,33	0,74	-0,5	0,26	0,4	1		
Cr	-0,49	-0,16	0,25	0,54	0,78	0,8	0,77	0,26	0,04	0,34	0,53	0,33	0,57	0,40	0,63	0,58	0,89	0,78	0,42	0,69	0,31	-0,7	0,4	0,3	1	

## 4. Discussion

### 4-1. Analyses physico-chimiques

Les paramètres physicochimiques des eaux du bassin versant de la Loutété ne montrent pas fortes concentrations. Pour la majeure partie des paramètres ont des teneurs inférieures aux valeurs limites de l'OMS [9] pour une eau de consommation. Les variations saisonnières des paramètres physicochimiques ne sont presque pas observées [11]. La température bien que moins variable, mai présente une hausse au cours des saisons (25,5 à 28°C) supérieure à la valeur limite de l'OMS (26,5°C). Toutefois, cette hausse saisonnière de température ne présente aucun danger pour la population consommatrice de cette eau car elle correspond aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes [12, 13]. Les pH dans l'ensemble des eaux étudiées, tendent vers les valeurs basiques (7,8 – 8,84) avec une moyenne de 8,32 cette moyenne est dans la gamme des valeurs de pH limite de l'OMS (6,5-9) pour les eaux de consommation. La gamme de valeur de pH des eaux drainant les roches détritiques carbonatées est comprise entre 7,3 et 8,3 [14]. Dans notre zone d'études les eaux du bassin versant drainent également des roches détritiques carbonatées. Les teneurs des pH observées sont dues à l'altération des formations carbonatée qui affleurent le long des cours d'eau. Les résultats sont similaires à ceux enregistrés dans les eaux de surface du district de Nkayi [14]. Ainsi, cette gamme de pH de 7 à 8 traduirait le pouvoir tampon des eaux du bassin versant drainant les roches carbonatées de la zone. Les valeurs des pH montrent des variations spatiales au sein du bassin versant, les eaux de la partie sud drainant les formations des Schito-gresex ont une moyenne de pH de 7,9 par contre les eaux du nord drainant les formations des Schisto-calcaire, la moyenne de pH est de 8,8. Les eaux étudiées sont faiblement minéralisées la moyenne de CE est de 49,09  $\mu\text{S}/\text{cm}$  dans la majorité des eaux. Sauf le point Mandzassi qui a une moyenne de 260,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Ces résultats sont largement en dessous des valeurs mesurées dans les eaux du district de Nkayi (sud du Congo) où les valeurs oscillent entre 36,5 à 289,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [14] ; seul les eaux de Malouénda montrent des similitudes aux eaux de Nkayi. Car Malouénda a une conductivité moyenne de 260,25  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Par contre nos résultats montrent des similitudes à ceux observés dans les eaux de surface de trois cours d'eaux (la Maty, la Mary et Gamboma) dans les plateaux de Mbé où les valeurs oscillent entre 5,14 et 16,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [15, 16]. La faible minéralisation est due à la faible influence anthropique. Les eaux du bassin versant sont moins turbides ce qui se confirme avec les valeurs de la turbidité obtenues (2,4 NTU) de même que celles de TDS. Ces faibles variations sont dues à la faible mobilisation des sédiments car les eaux coulent sur des lits rocaillieux. Les valeurs de TDS est inférieure à 1000mg/L, ce qui traduit une eau douce [17]. Les cations et anions majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) dans l'ensemble ont des valeurs faibles (2 à 11,9 mg/L pour les cations et 2,1 à 22,2 mg/L pour les anions) et ne présentent pas des variations saisonnières significatives. Les valeurs des cations et des anions enregistrées dans le bassin versant de la Loutété différent largement de celles observées dans les eaux du district de Nkayi qui montrent des fortes concentrations en bicarbonate (147,5 mg/L), sulfate (45 mg/L) et nitrate (37,47 mg/L) [14]. Ces résultats seraient occasionnés par la forte influence anthropique. Selon les auteurs, les valeurs élevées sont observées en saison des pluviieuses, ce qui indiquerait un phénomène de pluviolessivage et d'altération chimiques des roches (dolomies) présentes dans la zone [17]. Par contre les valeurs des teneurs de ces éléments chimiques sont sensiblement semblables de celles observées dans les eaux de surfaces des plateaux de Mbé [13, 17]. Toutefois, les faibles teneurs en cations et anions indiquent une bonne qualité des eaux [4]. Les valeurs des nitrate observées dans la zone d'étude sont faibles (2,17mg/L en moyenne) et largement inférieures aux teneurs observées dans le district de Nkayi [14] mais semblables aux teneurs des eaux des plateaux de Mbé. Pour ces eaux de Nkayi, les teneurs varient de 2,35 à 55,38 mg/L, valeurs attribuées à la pollution des eaux

par le rejet des eaux usées. Les faibles valeurs de nitrates observées dans la zone d'étude sont dues à la décomposition des matières organiques (végétaux), ce qui justifie l'absence de pollution anthropique. Les éléments métalliques traces comme Zinc, Cuivre, Cadmium, Manganèse et chrome présentent des teneurs inférieures à celles préconisées par l'OMS pour les eaux de consommation. Par contre d'autres paramètres comme (Fe, le Pb et l'Al) présentes une hausse légèrement supérieure aux valeurs maximales tolérées par l'OMS. Ces éléments traces, évoluent de 0,02 à 0,03 mg/L pour le Plomb, l'OMS le fixe à 0,01 mg/L ; le fer varie de 0,3 à 0,9 mg/L, (OMS 0,2 mg/L) et l'Aluminium varie de 0,33 à 0,44 mg/L (OMS < 0,2 mg/L). Cette légère augmentation des teneurs est due à l'altération chimique des formations géologiques et des minéraux des sols calco-magnésiens et ferrallitiques de la zone [9, 18]. Le Plomb et l'Aluminium présentent un problème les humains et la vie aquatique [19].

#### 4-2. Classification chimique des eaux

L'analyse hydrochimique a révélé deux faciès : le faciès bicarbonaté calcique (75 %) et chloruré calcique (25 %). Les cations dominants sont les calciques et pour les anions,  $\text{HCO}_3^-$ . Les bicarbonates et calcium proviennent de l'altération des formations géologiques de la zone. Les formations qui affleurent dans la zone d'étude sont des dolomies calcaires.

#### 4-3. Analyse en composantes principales

Le fonctionnement hydro-chimique du bassin versant a été déterminé à partir de l'analyse des variables de l'ACP dans le plan factoriel F1- F2 (**Figure 5**). L'analyse montre que le plan factoriel (F1-F2) représente 55,97 % de la variable exprimée. Le facteur F1 regroupe la majorité des paramètres 37,51 % pour le facteur F1 et 18,46 % pour le facteur F2. Le facteur F1 définit l'axe de la minéralisation globale des eaux. La majorité des paramètres chimiques y compris les éléments en traces métalliques considérés sont groupés au tour de ce facteur. Les bonnes corrélations entre ces paramètres chimiques traduiraient une origine commune entre ces paramètres. Les autres éléments notamment F-, pH et  $\text{SiO}_2$  sont groupés dans au tour du facteur F2. Cette opposition traduit une autre source de minéralisation des eaux. Les deux groupements permettent de retenir deux phénomènes de minéralisation des eaux dans la zone d'étude, la minéralisation par altération des formations géologique et phénomène de minéralisation par pluvio-lessivage des sols. Le premier groupement qui prend en compte  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ , traduit une minéralisation par altération des roches. Le deuxième groupement tient en compte F-, pH,  $\text{SiO}_2$  met en évidence un phénomène de minéralisation par pluvio-lessivage [20]. De façon générale, la minéralisation des eaux du bassin versant de la Loutété est régie par deux phénomènes, l'altération des roches et le pluvio-lessivage des sols. Les formations géologiques de la zone d'étude contiennent le Plomb, Cuivre et Zinc. La présence de ces éléments dans les eaux étudiées permet de retenir l'hypothèse d'une minéralisation par altération des roches. Les faibles teneurs de nitrate dans les eaux étudiées permettent de rejeter la minéralisation par action anthropique.

### 5. Conclusion

Les résultats de cette étude ont permis de caractériser les variations saisonnières des paramètres physicochimiques des eaux du bassin versant de la Loutété. Ces résultats ont montré des faibles variations saisonnières. Sur le plan physicochimique, les résultats montrent que les eaux du bassin versant de la Loutété sont légèrement basiques ( $7,9 < \text{pH} < 8,8$ ) et faiblement minéralisée ( $9,7 \mu\text{S}/\text{cm} < \text{CE} < 441 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Les paramètres physico-chimiques sont en majorités en dessous des normes de potabilité de l'OMS, excepté les teneurs en silices (6,7 à 16,9 mg/L) en Plomb (0,01 à 0,03 mg/L), Aluminium (0,01 à 0,3mg/L). Cette hausse des teneurs en période humide peut entraîner des conséquences écologique et sanitaire. Deux faciès

hydrochimiques sont mis en évidence par le diagramme triangulaire de Piper : faciès bicarbonaté calcique (75 %) et chloruré calcique (25 %). Les variations saisonnières des faciès ne sont pas significatives car les eaux semblent montrer les mêmes faciès au cours de l'année. L'analyse en composante principale (ACP) montre deux mécanismes de minéralisation des eaux : l'altération chimique des roches et le pluviolavage des sols. Les faibles variations saisonnières traduisent une hétérogénéité des eaux en éléments physico-chimiques au cours de la période hydrologique. L'action anthropique a une faible influence sur la minéralisation des eaux du bassin versant de la Loutété. La qualité de l'eau est altérée pendant la période de retours des pluies en métaux lourds et ce qui présente un danger pour la santé de la population et les écosystèmes aquatiques.

### Références

- [1] - G. BASSAKOUAHOU, U. G. MBILOU et M. NGOUALA MABONZO, "Caractérisation hydrochimique des eaux de surface du bassin versant de la Loutété (sud de la République du Congo)". *Journal of Animal & Plant Sciences*, Vol. 54, N°2 (2022) 9881 - 9897 p.
- [2] - AQUASTAT, Irrigation en Afrique, en chiffres-enquête, (2005) 10 p.
- [3] - J. COSSON, "Notice explicative sur les feuilles de Pointe-Noire et Brazzaville. Carte géologique de reconnaissance au 1/500,000", Dir. Min. Géol. AEF, (1955) 56 p.
- [4] - Y. B. PAMBOU, E. A. APINDA LEGNOUO, A. ALANKILA OTELE, A. M. MASSOLOU, N. NGAYILA, G. M. MADOUNGOU NDJEUNDA, C. R. ZINGA and J. F. MAVOUNGOU, Variabilité saisonnière de la qualité des eaux du bassin versant de Nzeng Ayong dans le sixième arrondissement de la commune de Libreville (Gabon). *J. Appl. Biosci.*, Vol. 169, (2022)
- [5] - P. ALVARZ, J-C. MARNN et J-C. VICAT, Formation de l'Inkisi (super groupe ouest-Congolien) en Afrique centrale Congo et bas-Zaïre : un delta d'âge paléozoïque comblant au bassin en extension, 20 (2) (1995) 119 - 131 p.
- [6] - B. DENIS et J. M. RIEFFEER, "Notice explicative n°60, Carte pédologique de Madingou du Congo, République Populaire de Congo", 1/200.000. *Éditions ORSTOM*, (1975) 6 p.
- [7] - D. SCHWARTZ, Les podzols tropicaux sur les sables Batékés en République Populaire du Congo : description, caractérisation, genèse. ORSTOM, Pointe-Noire (Congo), (1987) 25 - 36 p.
- [8] - M. J. SAMBA-KIMBATA, "Précipitation et bilan de l'eau dans le bassin forestier du Congo et ses marges". Thèse d'Etat université de Bourgogne, Centre de Recherches de Climatologie, Dijon, France, (1991) 241 p.
- [9] - O. M. S, Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. intégrant le premier additif, (2017)
- [10] - (<https://www.sante.fr/decryptage/nos-reponses/laluminium-est-il-toxique-pour-le-cerveau>) site pour l'aluminium
- [11] - G. BASSAKOUAHOU, "Influence du climat sur les variations spatio-temporelles des paramètres hydrologiques et hydrochimiques des cours d'eaux du bassin versant de la Loutété au sud du Congo" Thèse de doctorat, Université Marien Ngouabi, (2023) 196 p.
- [12] - A. DIABAGATE, T. A. GOULA et G. E. SORO, "Hydrochimie des eaux Souterraines de la Région du Poro (Côte d'Ivoire)". *European Scientific Journal edition*, Vol. 15, N°9 (2019) 247 - 262 p.
- [13] - H. OBAMI-ONDON, M. NGOUALA MABONZO, U. G. MBILOU and B. MABIALA, Etude de la variabilité saisonnière des précipitations sur le plateau de Mbé au Pool-Nord (Congo-Brazzaville) : impacts sur les eaux de surface et souterraines. *Proc. IAHS*, 384 (2021) 233 - 239
- [14] - U. G. MBILOU URBAIN, M. NGOUALA MABONZO et H. MBANI LOUFOUMA, "study of the quality of Kongo lake water and rivers around sugar cane plantations in the district of Nkayi (Republic of Congo)". *African Journal of Science and Research*, 4 (2016) 22 - 27 p.

- [15] - H. OBAMI-ONDON, U. G. MBILOU, D. NKOUNKOU TOMODIATOUNGA, M. NGOUALA MABONZO, R. G. ELENGA, et B. MABIALA, "physicochemical Characterization of water of Congo Brazzaville". *American Journal of Environ protection*, Vol. 7, N°3 (2018) 40 - 54 p. doi : 10, 11648, j.asjep.20/80703.11
- [16] - H. OBAMI-ONDON, " Étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifère profond du plateau de Mbé au Pool-Nord, Thèse de Doctorat Unique, Université Marien NGOUABI, (2020) 150 p.
- [17] - O. F. ESSOULI, L. MATINI, T. MIYOUNA, F. BOUDZOU MOU, S. FAYE, Prospection Hydrogéologique et Géophysique du Système Aquifère du Plateau de Mbé, District de Ngabé, Congo. *European Scientific Journal October 2019 edition*, Vol. 15, N°30 ISSN : 1857 - 7881 (Print) e - ISSN 1857 - 7431
- [18] - S. G. EBLIN, A. P. SOMBO, GB. SORO, N. AKA, O. KAMBIRE et N. SORO, "Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est Côtier de la côte d'Ivoire)". *Journal of applied Biosciences*, 75 (2014) 6259 - 6271
- [19] - A. BOUAMAMA, Influence de la physico-chimie des eaux de ruissellement sur la vulnérabilité des ouvrages de rétention, Thèse de doctorat unique, Normandie Université 2018). Français. ffNNT, (2018) NORMLH04. 177 p.
- [20] - Z. MFONKA, J. R. NDAM NGOUPAYOU, P. D. NDJIGUI, M. ZAMMOURI, A. KPOUMIE et E. RASOLOMANANA, Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9 (4) (2015) 2200 - 2218