

Influence environnementale sur la qualité des eaux de surface du bassin versant de la Loudima, sud – est de la République du Congo

Médard NGOUALA MABONZO
medngouala@yahoo.fr

Caleb Abogaëli BISSOMBOLO BANZOUZI
calebabogaelibissombolobanzouzi@gmail.com

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

Résumé

Cette étude vise à analyser l'influence des facteurs environnementaux sur la qualité des eaux de surface du bassin versant de la Loudima, situé au sud-est de la République du Congo. Pour ce faire, 16 échantillons d'eau ont été prélevés entre juillet et novembre 2022, couvrant les saisons pluvieuse et sèche. L'évaluation de ces eaux repose sur la mesure de plusieurs paramètres physico-chimiques réalisés sur le terrain et en laboratoire notamment : pH, température (T°C), conductivité électrique (CE), solides dissous totaux (TDS), Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, Fe²⁺, Al³⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺, NH₄⁺, Cu²⁺, PO₄³⁻, titre alcalimétrique complet (TAC), titre hydrotimétrique total (THT), SiO₂, turbidité, couleur et matières en suspension (MES). L'application des approches statistiques et hydrochimiques a permis de découvrir les processus de minéralisation des eaux de surface du bassin versant de la Loudima. Les résultats obtenus montrent que les eaux de ce bassin dans son ensemble sont basiques et présentent des concentrations en cations qui varient entre 0,14 et 23 mg.l⁻¹ ; tandis que celles des anions oscillent entre 0,7 et 29,12 mg.l⁻¹. La minéralisation des eaux de surface dans cette région est principalement l'influencée par les facteurs environnementaux ainsi que par les processus de dissolution et de précipitation des minéraux. Cette étude met également en évidence l'existence d'une seule famille d'eau dans l'ensemble du bassin versant de la Loudima caractérisée par des eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes.

Mots clés : Congo, Loudima, bassin versant, eau de surface, Influence environnementale.

Environmental influence on the quality of surface water in the Loudima watershed, south-east of the Republic of Congo

Abstract

This study aims to analyze the influence of environmental factors on the quality of surface water in the Loudima watershed, located in the southeast of the Republic of Congo. To do this, 16 water samples were taken between July and November 2022, covering the rainy and dry seasons. The evaluation of these waters is based on the measurement of several physicochemical parameters carried out in the field and in the laboratory, including: pH, temperature (T°C), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, Fe²⁺, Al³⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺, NH₄⁺, Cu²⁺, PO₄³⁻, total alkalimetric titer (TAC), total hydrotimetric titer (THT), SiO₂, turbidity, color and suspended solids (MES). The application of statistical and hydrochemical approaches has made it possible to discover the mineralization processes of surface waters in the Loudima watershed. The results obtained show that the waters of this basin as a whole are basic and have cation concentrations that vary between 0.14 and 23 mg.l⁻¹; while those of anions oscillate between 0.7 and 29.12 mg.l⁻¹. The mineralization of surface waters in this region is mainly influenced by environmental factors as well as by the processes of dissolution and precipitation of minerals. This study also highlights the existence of a single family of water in the entire Loudima watershed characterized by chlorinated and sulfated calcium and magnesium waters.

Keywords: Congo, Loudima, watershed, surface water, environmental influence.

Introduction

Les ressources en eau, dans leur environnement, sont rarement pures. Divers éléments peuvent altérer leur composition de base par diffusion, dissolution, hydrolyse, ou un simple mélange (I. Savané et N. Soro, 2001, p.380 ; J. Xiao et *al.*, 2012, p.163 ; T.K. Yao et *al.*, 2012, p.7069). Ainsi, la composition chimique de l'eau dépend directement de l'environnement dans lequel elle évolue. Les éléments qui s'y intègrent lui confèrent un chimisme spécifique, reflétant les caractéristiques de son parcours (J. Xiao et *al.*, 2012, p.163). En République du Congo, la vallée du Niari, qui constitue l'une des principales unités orographiques du bassin versant du Niari (comprenant les bassins versants de Loubomo et Loutété), est confrontée à une disponibilité limitée en eau. Cette ressource représente un potentiel important pour l'approvisionnement en eau des populations du bassin versant de la Loudima et de son ensemble. La méconnaissance de cette ressource constitue un risque du point de vue qualitatif pour la santé des populations consommatrices ainsi qu'un défi pour la communauté scientifique et les gestionnaires de la ressource. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, qui vise à caractériser les paramètres physicochimiques des eaux de surface de ce bassin et à analyser l'évolution spatio-temporelle de leur minéralisation. Pour cela, une approche combinant méthodes géochimiques et analyses statistiques est adoptée ; afin de garantir une gestion optimisée et durable de cette ressource essentielle pour cet espace géographique.

1. Méthodologie

1.1. Cadre général de l'étude

Le bassin versant de la Loudima est situé dans la vallée du Niari au sud-ouest de la République du Congo, entre les latitudes 4°0'0" et 4°50'0" Sud et les longitudes 12°50'0" et 13°40'0" Est (Figure 1). Cette région appartient à deux grandes unités orographiques, à savoir, les pays du Niari et de la Nyanga, ainsi que la vallée du Niari (Atlas du Congo, 2001, p.8).

Les pays du Niari et de la Nyanga comprennent un fragment du socle et son enveloppe sédimentaire. Le massif du Chaillu, constitué essentiellement de granit et de gneiss, présente des altitudes pouvant atteindre 850 m aux environs de Mayoko. Ce relief est caractérisé par des niveaux d'érosion étagés, mais, sous un couvert forestier dense, il se distingue principalement par des formations géologiques encadrées par un réseau hydrographique très serré, dont le tracé est largement influencé par des fractures et diaclases présentes dans la roche.

La vallée du Niari, quant à elle, s'étend et s'élargit d'est en ouest. Il s'agit d'une plaine d'érosion creusée dans des formations schisto-calcaires, marquée par la présence de dolines et de dépressions fermées. Le fleuve Niari, nettement encaissé, y adopte un tracé sinueux, bordé des rives escarpées.

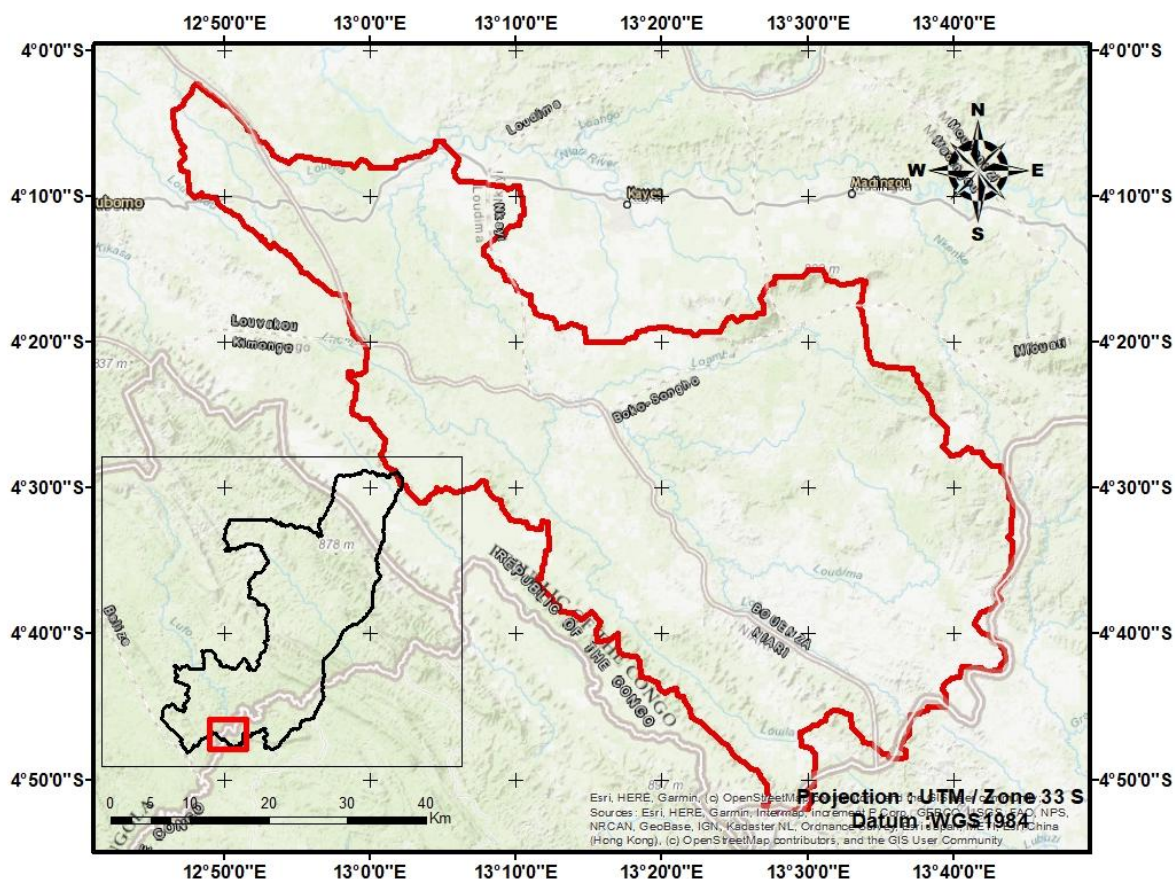


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de la Loudima

D'un point de vue géologique, le bassin versant de la Loudima est entièrement constitué de formations appartenant au super groupe Ouest-congolien. Celui-ci se compose du haut vers le bas du groupe des Diamictites et grès, du groupe Schisto-calcaire et du groupe schisto-grésseux (F. Boudzoumou et R. Trompette, 1988, p.896). Les sols de la région se répartissent en trois principales classes : les sols ferrallitiques, les sols hydromorphes et les sols alluviaux (A. Mapangui, 1988, p.16). La végétation du bassin versant est dominée par deux grands paysages : les forêts et les savanes (J. Koechlin, 1961, p.62).

Le climat de la région est de type tropical humide, dominé par une saison des pluies qui s'étale de novembre à avril et une saison sèche de juin à septembre (M.J. Samba-Kimbata., 2002, p.83).

1.2. Matériel et méthodes

Cette étude repose sur l'analyse physico-chimique de 16 échantillons d'eau prélevés en juillet et novembre 2022. La température, le pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés directement sur le terrain (in situ). Les analyses en laboratoire ont été réalisées à l'Institut des Recherches des Sciences et Naturelles de Brazzaville et ont porté sur les principaux cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+), les principaux anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) ainsi que certains ions mineurs. Sur le terrain, les paramètres physiques ont été mesurés à l'aide des équipements suivants : (1) un pH/mV/°C mètre de type ADWA AD111. (2) un conductimètre portable de type HANN HI 8733. (3) En laboratoire, la détermination des principaux éléments chimiques a été réalisée par chromatographie ionique en utilisant un DIONEX ICS-1100, au sein du Centre d'Analyse de l'IRSEN à Brazzaville.

1.2.1. Traitement des données

L'analyse des données repose sur deux approches complémentaires : hydrochimique et statistique, appliquées aux ACP et CAH, deux méthodes couramment utilisées dans l'étude des phénomènes environnementaux à l'origine de la minéralisation des eaux.

L'ACP est une méthode statistique descriptive permettant de représenter graphiquement le maximum d'informations contenues dans une base de données, sous forme d'une matrice où les lignes correspondent aux individus (e.g. points d'eau) et les colonnes aux variables (pH, T°, CE, éléments majeurs et traces). Elle réduit les variables afin de projeter le point dans un plan bidimensionnel 2D (V. Cloutier *et al.*, 2008, p.296, S. M. Yidana *et al.*, 2008, p.1215). La CAH permet de mesurer la similarité ou la dissimilarité entre les échantillons ; définissant ainsi un critère d'agrégation des classes (M. Templ *et al.*, 2008, p.2200). L'approche hydrochimique, quant à elle, repose sur l'utilisation du diagramme de Piper permettant de classer les eaux et d'identifier les processus hydrochimiques dominants, tels que le mélange, l'échange d'ions et la dissolution des minéraux influençant la composition chimique des eaux de surface. L'ensemble des analyses a été effectué sur 26 variables : pH, température (T°C), conductivité électrique (CE), solides dissous totaux (TDS), Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, Fe²⁺, Al³⁺, Mn²⁺, Pb²⁺, Zn²⁺, NH₄⁺, Cu²⁺, PO₄³⁻, titre alcalimétrique complet (TAC), titre hydrotimétrique total (THT), SiO₂, turbidité, couleur et matières en suspension (MES).

2. Résultats

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de surface de la rivière Loudima et ses tributaires sont présentés dans le Tableau 1. L'analyse de ces données révèle que ces eaux sont modérément minéralisées. La conductivité électrique (CE) varie entre 68 et 146 µS/cm, avec une moyenne de 112,63 µS/cm, indiquant une faible concentration en ions dissous. Ces eaux sont basiques, avec un pH oscillant entre 7,21 et 7,51, pour une moyenne de 7,41. De plus, les concentrations en éléments majeurs et traces restent faibles sur l'ensemble des échantillons analysés, confirmant la relative pureté chimique des eaux de surface de cette région.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico - chimiques des eaux de surface de la zone d'étude

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7,21	7,51	7,41	0,114
T°C	27,6	28,3	27,83	0,254
CE (µS/cm)	68	146	112,63	33,644
TDS (mg/l)	33	72	55,38	16,783
Ca ²⁺ (mg/l)	14	23	18,63	3,502
Mg ²⁺ (mg/l)	7	13	9,6	2,017
Na ⁺ (mg/l)	0,14	0,72	0,47	0,233
K ⁺ (mg/l)	1,3	8	4,6	2,318
Cl ⁻ (mg/l)	10,43	29,12	20,66	8,269
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	5	11	8,13	2,031
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	14,64	29,03	19,40	5,836
NO ₃ ⁻	0,7	1,22	0,91	0,197
Fe ²⁺ (mg/l)	0,04	0,47	0,19	0,172
Al ³⁺ (mg/l)	0,02	0,06	0,04	0,014

Mn ²⁺ (mg/l)	0,023	0,052	0,04	0,01
Pb ²⁺ (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0
Zn ²⁺ (mg/l)	0,01	0,03	0,02	0,007
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,03	0,07	0,05	0,012
Cu ²⁺ (mg/l)	0,05	0,09	0,07	0,012
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	0,03	2,9	1,29	1,31
TAC	11	24	16	4,898
THT	15	50	27,5	13,363
SiO ₂	2,01	2,3	2,14	0,099
Turbidité	1,3	4	2,61	1,002
Couleur	1	4	1,76	0,992
MES	1,06	1,56	1,28	0,201

2.1. Faciès chimique des eaux de surface du bassin versant de la Loudima

Le faciès obtenu dans les eaux de la rivière et ses tributaires a été déterminé à l'aide du diagramme de Piper, une méthode classique d'analyse hydrochimique. La représentation des paramètres physiques, ainsi que des concentrations en ions majeurs et mineurs, sur ce diagramme (Figure 2), a permis d'identifier une seule famille d'eau homogène sur l'ensemble de cet espace géographique.

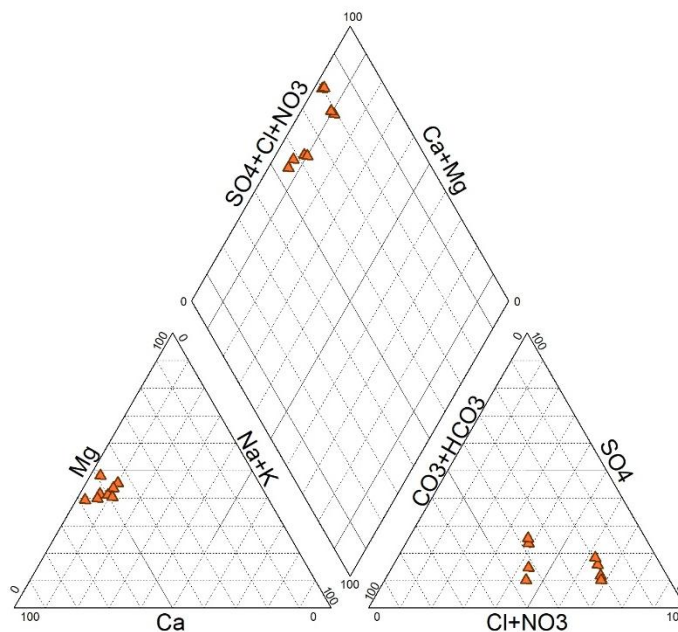


Figure 2 : Classification hydrochimique des eaux de surface du bassin versant de la Loudima.

L'analyse du diagramme de Piper révèle que les eaux de surface du bassin versant de la Loudima sont majoritairement chlorurées et sulfatées, calciques et magnésiennes. Ce faciès hydrochimique est uniformément observé à travers l'ensemble des échantillons prélevés dans la zone d'étude.

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff (Figure 3) permet une représentation détaillée du faciès chimique des eaux de la Loudima et ses envois. Chaque échantillon y est figuré par une ligne

brisée où les concentrations des éléments chimiques sont disposées selon une échelle logarithmique verticale. L'interconnexion des points correspondant aux différents éléments forme cette ligne brisée. Lorsque ces lignes se croisent, cela indique un changement de faciès chimique, mettant en évidence des variations dans la composition des eaux.

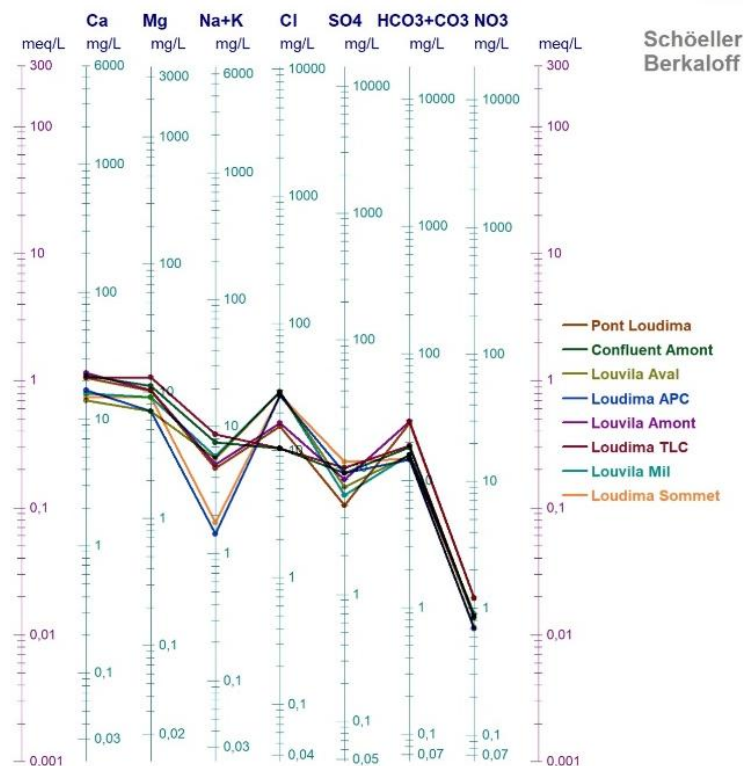


Figure 3 : Diagramme de Schöeller Berkloff

Selon cette représentation, les ions dominants sont les chlorures (Cl^-) pour les anions et le calcium (Ca^{2+}) pour les cations. Sur le diagramme, les cations sont placés à gauche et les anions à droite. Il en ressort que le point pont Loudima en amont présente la plus forte concentration en bicarbonates (HCO_3^-), un phénomène également observé pour le calcium. Le même constat est fait dans Loudima amont par la concentration de calcium (Ca^{2+}) à Loudima amont. Les concentrations des principaux ions suivent l'ordre suivant : anions ($\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$) et cations ($\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}+\text{K}$). L'ensemble des profils analysés révèle des contrastes marqués entre cations et anions.

Le diagramme de Stabler (Figure 4) met en évidence la prédominance des ions chlorures (Cl^-) sur les ions bicarbonates (HCO_3^-) et les sulfates (SO_4^{2-}) à l'échelle de la zone d'étude. Le calcium (Ca^{2+}) reste le cation dominant, suivi du magnésium (Mg^{2+}). Toutefois, une exception est observée à Louvila milieu : l'ion potassium (K^+) devient le prédominant, contrastant avec les autres points d'échantillonnage où ses concentrations restent faibles. Une variabilité similaire est notée pour l'ion chlorure (Cl^-) dont les concentrations fluctuent selon les points sélectionnés et analysés dans cet espace géographique.

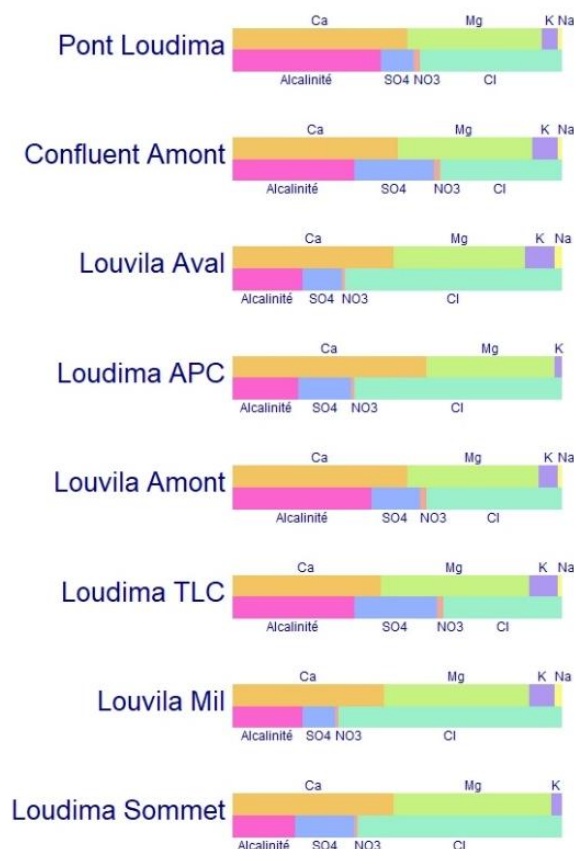


Figure 4 : Diagramme de Stabler des eaux de surface du bassin versant de la Loudima

2.3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode factorielle multidimensionnelle permettant de traiter des données numériques en l'occurrence les résultats des analyses chimiques des eaux. Cette technique vise à identifier les principales tendances des données et à orienter l'interprétation hydrochimique, les valeurs propres des facteurs sont présentées dans les figures 5 et 6. L'ACP a été réalisé sur un ensemble de variables incluant : le pH, la conductivité électrique (CE), la température, le total des solides dissous ainsi que les ions majeurs et mineurs. Les deux premiers axes factoriels (1 et 2) expliquent 58,97 % de la variance en saison des pluies et 49,96 % en saison sèche (Figure 5).

La projection des variables sur le plan factoriel en saison des pluies montre que l'axe 1 regroupe la moitié des éléments dans le pôle négatif, tandis que l'autre moitié se situe dans le pôle positif. Par contre, l'axe 2 rassemble la quasi-totalité des éléments dans le pôle positif, à l'exception des variables HCO_3^- , K^+ , TH et Cl^- , qui se positionnent dans le pôle négatif. Ces résultats, illustrés dans la Figure 5, montrent une forte corrélation entre plusieurs de ces variables, mettant en évidence les interactions chimiques influençant la composition des eaux de surface du bassin versant de la Loudima.

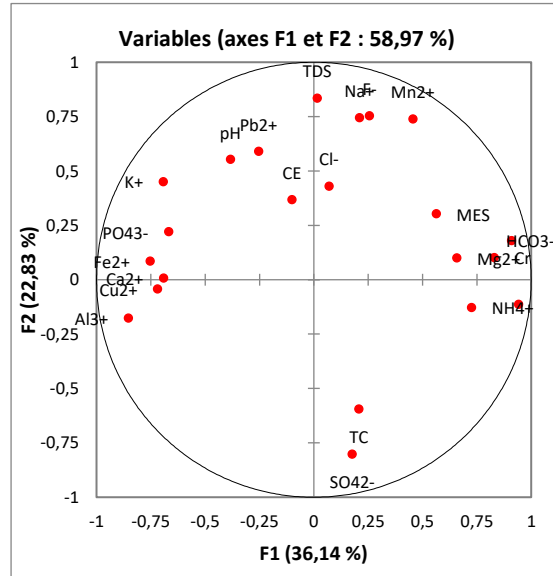


Figure 5 : Représentation des variables dans le plan des deux premiers axes

En conclusion, les résultats obtenus de cette étude confirment la stabilité et la bonne minéralisation des eaux de surface de cette zone géographique. L'analyse en composantes principales montre que toutes les variables sont étroitement regroupées autour des axes factoriels F1 et F2, soulignant ainsi la cohérence des interactions hydrochimiques observées.

2.3.1. Matrice de corrélation

Dans cette étude hydrochimique, l'analyse des relations entre les variables (ou descripteurs) chimiques a été réalisée à l'aide d'une matrice de corrélation statistique sous ACP (Tableau II). Cette approche permet de mieux comprendre les associations entre les principaux descripteurs hydrochimiques.

Il met en évidence différentes corrélations. Ainsi, les corrélations fortes et positives entre certains couples d'éléments, notamment : PO_4^{3-} et Fe^{2+} (0,98) ; Al^{3+} et Fe^{2+} (0,88) ; PO_4^{3-} et Al^{3+} (0,80) ; Cl^- et pH (0,74). Puis des corrélations moyennes positives observées entre : HCO_3^- et Mg^{2+} (0,69) ; HCO_3^- et NH_4^+ (0,65) ; PO_4^{3-} et K^+ (0,63), TDS et CE ; Al^{3+} et Mn^{2+} ; Pb^{2+} et K^+ (0,62) ; Fe^{2+} et K^+ (0,61) ; Cu^{2+} et K^+ (0,55) ; Pb^{2+} et Na^+ ; Mn^{2+} et TDS (0,56) ; Pb^{2+} et Ca^{2+} (0,54) ; NH_4^+ et Mn^{2+} (0,52) ; Na^+ et TDS ; K^+ et Ca^{2+} (0,50). Enfin, il existe des corrélations négatives entre certains éléments, ci-après : K^+ et T°C (-0,56) ; Mn^{2+} et Al^{3+} (-0,50) ; NH_4^+ et Ca^{2+} (-0,80) ; NH_4^+ et K^+ (-0,65) ; NH_4^+ et Al^{3+} (-0,58) ; HCO_3^- et pH (-0,51) ; HCO_3^- et Ca^{2+} (-0,72) ; HCO_3^- et Fe^{2+} (-0,56) ; HCO_3^- et Al^{3+} (-0,69) ; HCO_3^- et Cu^{2+} (-0,65) ; SO_4^{2-} et TDS (-0,70) ; SO_4^{2-} et Na^+ (-0,61) ; SO_4^{2-} et Mn^{2+} (-0,56) et SO_4^{2-} et Pb^{2+} (-0,63).

Comme l'indique le Tableau 2, les différentes variables des eaux du bassin versant de la Loudima sont fortement et moyennement corrélées positivement, ce qui traduit une évolution simultanée de ces paramètres. Ces corrélations suggèrent que ces éléments des sources communes sont influencés par des processus de dilution ou d'évaporation.

Dans ce contexte géographique, ces résultats peuvent être interprétés comme une minéralisation progressive des eaux le long des axes d'écoulement, résultant de mécanismes communs influençant leur composition chimique.

Tableau 2 : Matrice de corrélation des éléments chimiques issue de l'ACP

Variables	Ph	TC	CE	TDS	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	Fe2+	Al3+	Mn2+	Pb2+	NH4+	Cu2+	HCO3-	PO43-	Cl-	SO42-	
pH	1	0,48	0,07	0,42	0,43	-0,37	0,45	0,22	-0,01	0,07	0,16	0,12	-0,35	0,39	-0,51	0,03	0,74	-0,37	
TC		1	0,22	0,27	-0,09	-0,14	0,30	0,56	-0,23	0,05	-0,45	-0,17	0,11	-0,39	0,09	-0,38	0,43	0,27	
CE			1	0,62	-0,04	0,08	0,28	0,20	0,14	0,02	0,01	0,43	-0,30	0,14	0,05	0,07	0,18	-0,26	
TDS				1	-0,22	-0,08	0,50	0,37	0,01	0,13	0,56	0,37	-0,08	-0,01	0,21	0,08	0,45	-0,70	
Ca2+					1	-0,27	0,20	0,50	0,29	0,42	-0,41	0,54	-0,80	0,37	-0,72	0,20	0,16	-0,09	
Mg2+						1	0,42	0,15	-0,47	0,54	0,20	0,11	0,14	-0,38	0,69	-0,39	0,04	0,24	
Na+							1	0,11	-0,19	0,36	0,42	0,56	-0,29	-0,40	0,21	-0,01	0,25	-0,61	
K+								1	0,61	0,62	0,06	0,62	-0,65	0,55	-0,36	0,63	0,12	-0,40	
Fe2+									1	0,88	-0,18	0,35	-0,39	0,38	-0,56	0,98	0,40	-0,39	
Al3+										1	-0,50	0,17	-0,58	0,44	-0,69	0,80	0,45	-0,18	
Mn2+											1	0,32	0,52	-0,32	0,60	-0,01	0,27	-0,56	
Pb2+												1	-0,46	-0,07	-0,01	0,36	-0,3	-0,63	
NH4+													1	-0,40	0,65	-0,30	0,10	0,18	
Cu2+														1	-0,65	0,33	0,37	0,27	
HCO3-															1	-0,45	0,07	-0,02	
PO43-																1	0,27	-0,48	
Cl-																	1	-0,03	
SO42-																			1

2.3.2. Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le Tableau 3 présente la classification des variables (points de mesure) en différentes classes selon les deux saisons étudiées : saison des pluies et saison sèche. Il est à noter qu'en saison des pluies, la classe C1 est le premier regroupement avec trois variables, la classe C2 est le second regroupement, intégrant deux variables et enfin, la classe C3 est le troisième regroupement comprenant trois variables.

En saison sèche, la classe C1 est le premier regroupement avec deux variables, la classe C2 est le deuxième regroupement comprenant trois variables et la classe C3 est le troisième regroupement intégrant trois variables. Cette classification permet d'identifier les similarités et les différences entre les paramètres mesurés au cours des deux saisons.

Tableau 3 : Classification des paramètres par classe

Classe	C1	C2	C3
Variables	P1, P2 et P6	P3 et P4	P5, P7 et P8

La figure 6, issue de la CAH, met en évidence trois regroupements distincts des points de mesure reflétant une répartition cohérente des classes en fonction du comportement hydrochimique et des faciès observés. Le premier regroupement commun aux deux saisons traduit une minéralisation influencée par les apports superficiels. Le second regroupement correspond à une minéralisation plus faible, caractéristique du système d'aquifères du précambrien moyen et supérieur. Le troisième regroupement, intégrant certains ions majeurs et mineurs, indique une minéralisation liée aux apports superficiels, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique.

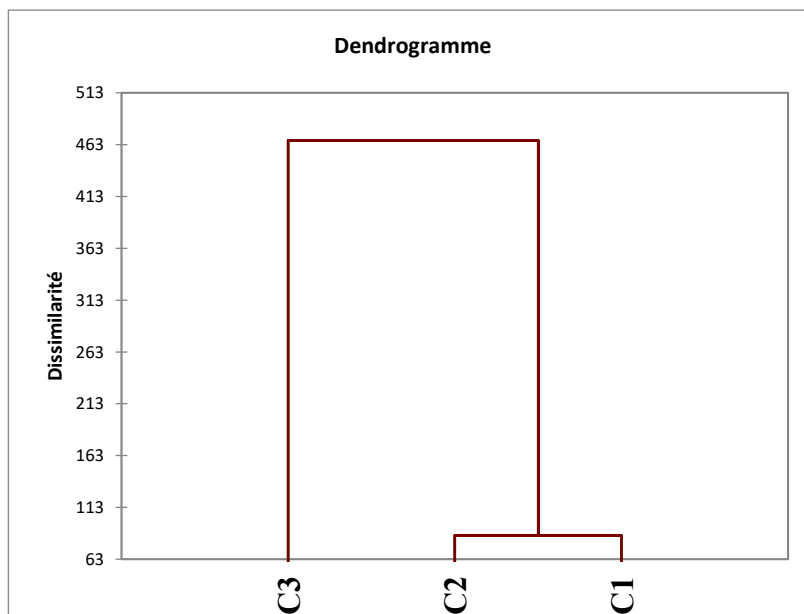


Figure 6 : Dendrogramme de classification des points d'eau

2.3.3. Paramètres de pollution

Les éléments minéraux considérés comme paramètres de pollution ont été analysés pour chaque saison (saison des pluies et saison sèche). Leurs concentrations sont représentées dans la Figure 7.

Les résultats montrent que les concentrations des paramètres étudiés ne dépassent pas les normes de potabilité établies par l'OMS (Genève, 2004). La Figure 7 met en évidence huit éléments chimiques (Fe^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Pb^{2+} , NH_4^+ , Cu^{2+} , Zn^{2+} et PO_4^{3-}). Bien que les teneurs restent inférieures aux seuils recommandés par l'OMS, ces éléments sont uniformément répartis sur l'ensemble de la zone d'étude, affectant ainsi les eaux de surface de manière homogène.

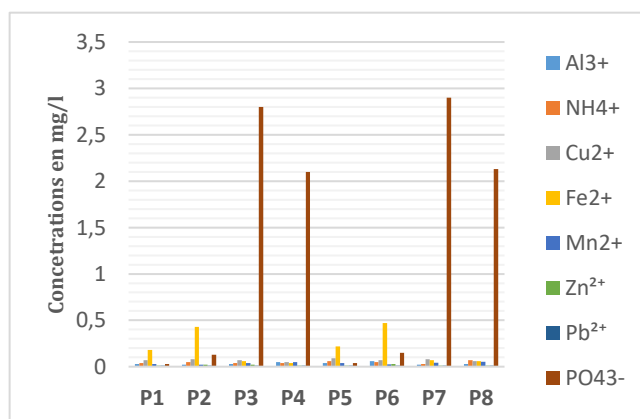


Figure 7 : Quelques paramètres de pollution dans les eaux de la rivière Loudima et ses tributaires

3. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude révèlent qu'elles sont basiques et faiblement minéralisées. Les concentrations des paramètres analysés restent, pour la majorité, inférieures aux valeurs limites établies par l'OMS (Genève, 2017) pour une eau destinée à la consommation.

Ces résultats sont en accord avec les caractéristiques des eaux de surface observées dans la plupart des rivières des bassins versants de la République du Congo. En effet, plusieurs études antérieures ont mis en évidence le faible niveau de minéralisation des eaux de surface dans différentes régions du pays. Elles ont spécifiquement porté sur le bassin versant de la Loutété, le bassin de la cuvette congolaise (U. G. MBILOU *et al.*, 2016, p.10), les cours d'eau de Brazzaville (M. Tchoumou *et al.*, 2017, p.68), massif du Chaillu (U. G. MBILOU *et al.*, 2021, p.280) et les plantations de cannes à sucre de Nkayi et ses environs (M. Ngouala Mabonzo 2021, p.18365). Ces études confirment le caractère non agressif des eaux de surface de la République du Congo. Elles montrent également que la faible moyenne minéralisation de ces eaux est fortement influencée par les conditions environnementales de chaque bassin versant. Les résultats de cette étude concordent avec ceux obtenus par plusieurs études antérieures. En effet, Y.M. N'guessan *et al.* (2016) ont rapporté des observations similaires, tout comme L. Akatumbila *et al.* (2016) dans la rivière urbaine Gombé à Kinshasa (République Démocratique du Congo) ; et M. Tchoumou *et al.* (2017) dans quatre cours d'eau de Brazzaville. De même, Y.B. Pambou *et al.* (2022) ont identifié des tendances comparables dans les eaux du bassin versant de Nzeng-Ayong, sixième arrondissement de Libreville (Gabon), tout comme J. Mfonka *et al.* (2015) dans celles du bassin versant du Nchi, situé sur le plateau Bamoun (Ouest Cameroun).

La plage de pH observée, comprise entre 7 et 8, reflète le pouvoir tampon des eaux du bassin versant, lesquelles drainent des roches carbonatées. Toutefois, des variations spatiales sont notées du sud au nord, avec des valeurs de pH avoisinant 7 sur l'ensemble des points de prélèvement. L'analyse géologique et pédologique confirme que le bassin versant est fortement influencé par l'environnement lithologique. En effet, la nature alcaline des eaux de surface s'explique par la présence de formations schisto-calcaires et schisto-gréseuses contenant de la dolomite ((Ca, Mg, CO) CO₃) comme minéral dominant. Les eaux échantillonnées présentent une faible minéralisation, avec une conductivité moyenne de 112,63 µS/cm bien inférieure aux valeurs relevées par U. G. Mbilou *et al.* (2016) dans les bassins versants de la Divouba et de la Louadi (district de Nkayi, sud du Congo), où les mesures oscillent entre 36,5 et 289,9 µS/cm.

Toutefois, les résultats de cette étude s'accordent avec ceux de G. Bassakouahou *et al.* (2022, p. 9893) concernant les eaux de surface du bassin versant de la Loudima, à l'exception du cours d'eau Malouénda, dont la conductivité moyenne atteint 260,25µS/cm. De plus, des similitudes sont observées avec les travaux de H. Obami-Ondon (2020) sur trois cours d'eau des plateaux de Mbé (Maty, Mary et Gamboma), où les valeurs fluctuent entre 5,14 et 16,3 µS/cm. Cette faible minéralisation s'explique par l'influence environnementale. D'un point de vue global, les eaux de surface de la Loudima sont claires et peu turbides, avec une turbidité moyenne de 2,61 NTU. Cependant, cette valeur dépasse légèrement en saison des pluies, lorsque les crues entraînent des débris végétaux et des particules de sable en suspension pendant plusieurs heures, voire quelques jours.

Les concentrations en cations majeurs (Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺) ainsi qu'en anions majeurs (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻) sont globalement faibles. Toutefois, ces valeurs sont largement inférieures à celles rapportées dans les eaux de Nkayi. En effet, leurs résultats indiquent des concentrations élevées en bicarbonate (147,5 mg/l), en sulfates (45 mg/l) et en nitrates (37,47 mg/l), attribuées à une forte influence anthropique (U.G.Mbilou *et al.*, 2016, p.10). En revanche, les observations faites dans cette présente étude sont comparables à celles de Eblin *et al.* (2014, p.196) au sujet des eaux de surface de la région d'Adiake, en Côte d'Ivoire. En effet, comme le souligne Eblin *et al.* (2014), les valeurs les plus élevées sont enregistrées en saison des pluies, ce qui suggère un phénomène de pluviolessivage associé à l'altération chimique des roches dolomitiques présentes dans la zone. Contrairement à Nkayi, l'impact anthropique est quasi inexistant dans la zone étudiée. Ainsi, la faible minéralisation des eaux pourrait être principalement régie par les processus naturels et environnementaux. Les nitrates y sont également faibles, avec une moyenne de 0,91 mg/l, bien en deçà des valeurs relevées par U.G. Mbilou *et al.* (2016) dans le district de NKayi, où elles varient de 2,35 à 55,38 mg/l. Ces résultats sont en revanche similaires à ceux obtenus par Foster *et al.* (1995), qui

rapportent des concentrations comprises entre 0,6 et 4,2 mg/l. Selon Mbilou *et al.* (2016), les teneurs élevées observées à Nkayi sont principalement dues aux rejets d'eaux usées. L'origine des nitrates dans l'eau peut être diverse. D'après A. D. Brahim *et al.* (2018, p.49), les nitrates peuvent résulter par transformation de l'ammoniacal et des nitrites, du lessivage ou du ruissellement lié à l'utilisation d'engrais. Par ailleurs, une faible concentration en nitrates dans les eaux des surfaces peut être attribuée à une croissance algale accrue dans certains sites ou à un processus de dénitrification, qui transforme les nitrates (NO_3) en azote gazeux (N_2) en présence de matière organique. Dans la zone d'étude, l'hypothèse privilégiée est celle de la nitrification, en raison de la présence de matières organiques dans certains points de prélèvement, ainsi que du phénomène de pluviollessivage.

Cet environnement présente les résultats des paramètres physicochimiques qui sont similaires à ceux trouvés par G. Bassakouahou *et al.* (2022, p. 9893) dans son analyse sur les eaux de surface du bassin versant de la Loutété et à ceux d'Obami-Ondon (2020) relativement aux eaux de trois cours d'eau (la Maty, la Mary et Gamboma) des plateaux de Mbé.

Les concentrations d'autres sels nutritifs tels que les phosphates (PO_4^{3-}) restent largement inférieures aux normes de l'OMS (5mg/l). Tout comme les nitrates, ces sels proviendraient du phénomène de pluviollessivage des sols. Toutefois, leurs teneurs restent faibles, car la zone étudiée est peu soumise à l'érosion hydrique en raison de la densité de sa couverture végétale. Dans ce contexte, l'infiltration prédomine sur le ruissellement, limitant ainsi le transfert des phosphates vers les eaux de surface. Concernant la silice (SiO_2), les concentrations des ions observées connaissent une variation plus ou moins importante par rapport aux normes établies par l'OMS (2011). Dans l'ensemble du bassin versant, les valeurs varient entre 6,7 et 16,9 mg/l, alors que la recommandation pour une eau potable est de ≤ 10 mg/l. Ces teneurs sont comparables, dans certains points d'échantillonnage, à celles rapportées par G. Eblin Sampah *et al.* (2014, p.195) dans la région d'Adiaké, en Côte d'Ivoire, où les valeurs oscillent entre 15,8 et 56,8 mg/l. En revanche, elles diffèrent de celles obtenues par M. N'Guessan Yao *et al.* (2016, p.399) dans les eaux de surface de Gascogne où les concentrations varient de 1,29 à 5,87 mg/l, avec une moyenne de 2,87 mg/l. Ces auteurs attribuent ces faibles teneurs à l'altération des minéraux silicatés (M. N'Guessan, 2016, p.400).

Dans la zone d'étude, les concentrations les plus élevées en silice ont été relevées lors des campagnes menées en janvier, mai et décembre, correspondant à la saison de pluies. La lithologie locale, dominée par des formations dolomitiques (schisto-calcaires et schisto-gréseuses), suggère que ces teneurs élevées résultent de l'altération chimique des minéraux associés à la dolomie.

Enfin, les éléments traces métalliques (Fe, Zn, Cu, Pb, Mn, etc.) présentent des concentrations inférieures aux seuils fixés par l'OMS. De manière générale, leur présence dans le bassin versant de la Loudima reste faible et conforme aux normes de qualité de l'eau potable.

Conclusion

L'étude de l'influence environnementale sur la qualité des eaux de surface du bassin versant de la Loudima situé au sud-est de la République du Congo a révélé une très faible minéralisation des eaux, avec une conductivité électrique (CE) variant entre 68 et 146 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et un pH compris entre 7,21 et 7,51, indiquant un caractère basique. Ces eaux présentent un faciès hydrochimique chloruré et sulfaté calcique-magnésien. L'analyse des paramètres chimiques de qualité montre que toutes les concentrations relevées sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS. De même, les éléments métalliques en traces, tels que le manganèse, le cuivre, le fer, le plomb et l'aluminium, sont présents à des teneurs faibles, conformes aux seuils recommandés par l'OMS. Les résultats obtenus indiquent que la minéralisation des eaux est contrôlée par plusieurs facteurs, notamment l'influence environnementale, le pluviollessivage des sols, les apports liés aux précipitations et, surtout, l'hydrolyse des minéraux de la roche. L'analyse de ces processus a permis de distinguer trois classes d'eaux au sein du bassin versant. Bien que ces résultats soient pertinents, ils méritent d'être approfondis par d'autres investigations, notamment une étude des métaux lourds et des paramètres chimiques liés à la pollution. Il serait également pertinent d'intégrer une analyse

bactériologique ainsi qu'une estimation des temps de résidence des eaux afin d'affiner la compréhension des dynamiques hydrochimiques de la zone.

Références bibliographiques

AKATUMBILA Augustin Luganga, MABIALA Molumba, LUBINI Constantin Ayingweu, PWEMA Victor Kiamfu, MUSIBONO Eyul'Anki, 2016, « Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau : cas de la rivière urbaine Gombé de Kinshasa/République Démocratique du Congo », Larhyss Journal, n°26, pp.7-29.

ATLAS, 2001, *République du Congo*. Ed.J.A., Paris, 69 p.

BASSAKOUAHOU Gilbert, MBILOU Urbain Gampio, NGOUALA MABONZO Médard, 2022, « 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 (2), pp.9881-9897.

BOUDZOUMOU Florent, TROMPETTE Roland, 1988, « La chaîne panafricaine ouest congolienne au Congo (Afrique Equatoriale) : un socle polycyclique charrié sur un domaine subautochtone formé par l'aulacogène du Mayombe et le bassin de l'Ouest –Congo », Bull. Soc. Géol. France, 8 (T. IV), n°6, pp. 889-896.

BRAHIM Ahmed Dick, ANAS Driouich, KHALID Digua, KANKOU Mohamed Sid'Ahmed, YAHYA Maham Ould Sidi, MOHAMED Fakhaoui, MOHAMED EL Kory Chiekh, HASSAN Chaair, 2018, « Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux traitées de la ville de Nouakchott, Mauritanie », Journal de la Société Chimique de Mauritanie 01, pp. 46-51.

CLOUTIER Vincent, LEFEBVRE René, THERRIEN René, SAVARD Martine, 2008, « Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system », Journal of Hydrology, pp. 294- 313.

EBLIN Sampah Georges, SOMBO Abé Parfait, SORO Gbombélé, AKA Natchia, KAMBIRE Olo, SORO Nagnin, 2014, « Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire) », Larhyss Journal, n°17, pp.193 – 214.

KOECHLIN Jean, 1961, *La végétation des savanes du sud de la République du Congo*. Mémoire n°1, ORSTOM, Montpellier, 310 p.

MAPANGUI Antoine, 1988, *Mécanisation des cultures et conservation des sols ferrallitiques dans la Vallée du Niari (Congo)*. 9e réunion du comité ouest et Centre Africain de corrélation des 5015,14 - 23 nov. 1988. Cotonou (Bénin), 16 p.

MBILOU Urbain Gampio, TCHOUMOU Martin, NGOUALA MABONZO Médard, 2016, « Étude de la composition physico-chimique des eaux du bassin de la cuvette congolaise, République du Congo », Rev. Ivoir. Sci. Technol., n°28, pp. 1–12.

MBILOU Urbain Gampio, NGOUALA MABONZO Médard, OBAMI-ONDON Harmel, 2021, «Multidimensional Analysis for the Assessment of the Physicochemical Quality of Waters in the Chaillu Massif (Republic of Congo) », Ind. J. Pure App. Biosci, 9(2), pp. 272-283.

MFONKA Zakari, NDAM NGOUPAYOU Jules Remy, NDJIGUI Paul-Désiré, RASOLOMANANA Eddy Harilala, MOUNIRA Zammouri, KPOUMIE Amidou, 2015, « Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun) », Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(4), pp. 2200-2218.

NGOUALA MABONZO Médard, 2021, « Hydrochemical and microbiological study of urban river waters in the agglomeration of Brazzaville (Republic of Congo) », International Journal of Agriculture and Environmental Science, Volume 8 (4), pp.29-36.

NGOUALA MABONZO Médard, 2021, « Assessment of the water quality of lake Kongo and rivers in the surroundings of sugar cane plantations in the city of Nkayi (Republic of Congo) », International Journal of Current Research, Vol. 13, Issue, 07, pp.18361-18367.

NGUESSAN Yao Mathieu, WANGO Ted Edgar, ADOPO Kouassi Laurent, PROBST Jean Luc, PROBST Anne, 2016, « caractérisation géochimique des eaux de surface dans un environnement agricole : cas de bassin versant de la Gascogne (Région Midi-Pyrénées, S-W de la France) ». International Journal of Innovation and Applied Studies, vol.17 (n°2). pp. 394-406.

OBAMI-ONDON Harmel, 2020, *Étude du fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique de l'aquifère profond du plateau de Mbé au Pool-Nord*, Thèse de Doctorat Unique, Université Marien NGOUABI, 150 p.

PAMBOU Yvon-Bert, APINDA LEGNOUO Emelie Arlette, ALANKILA OTELE Alice, MASSOLOU Annie Marcelle, NGAYILA Nadine, MADOUNGOU NDJEUNDA Guy Merlo, ZINGA Christophe Roland, MAVOUNGOU Jacques François, 2022, « Variabilité saisonnière de la qualité des eaux du bassin versant de Nzenz-Ayong dans le sixième arrondissement de la commune de Libreville (Gabon) ». Journal of Applied Biosciences n°169, pp. 17559– 17574.

SAMBA-KIMBATA Marie Joseph, 2002, « Rythme bioclimatique et comportement phénologique de la végétation en République du Congo », Annales Université Marien Ngouabi, pp.81-92.

SAVANE Issiaka, SORO Nagnin, 2001, «Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du nord-ouest de la Côte d'Ivoire : recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné », Africa Géoscience Review, 8(4), pp. 379-390.

TCHOUMOU Martin, KAMI-OUAKO Martin, MBILOU Urbain Gampio, OSSEBI Jean Grégoire, 2017, « Etude comparative des paramètres physicochimiques des eaux de quatre cours d'eau dans la ville de Brazzaville, République du Congo », Larhyss Journal, n°29, pp. 61-74.

TEMPL Matthias, FILZMOSEER Peter, REIMANN Clemens, 2008, « Cluster Analysis Applied to Regional Geochemical Data: Problems and Possibilities », Applied Geochemistry, 23, pp. 2198-2213.

XIAO Jun, ZHANG-DONG Jin, DING Hu, WANG Jin, ZHANG Fei, 2012, « Geochemistry and solutesources of surface waters of the TarimRiver Basin in the extreme arid region,NW Tibetan Plateau», J. Asian Earth Sci., n°55, pp.162-173.

YADINA SANDOW Mark, OPHORI Duke, BANOENG-YAKUBO Bruce, 2008, «Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area », Ghana Environmental Geology, vol. 53, pp.1213–1223.

YAO Theodore Koffi, OGA YEI Marie Solange, FOUCHÉ Olivier, BAKA Derving, PERNELLE Christine, BIEMI Jean, 2012, « Évaluation de la potabilité chimique des eaux souterraines dans un bassin versant tropical : cas du sud-ouest de la Côte d'Ivoire », Int. J. Biol. Chem. Sci., 6, pp. 7069-7086.