



**Original Paper**

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

## Etude hydrogéochimique des eaux thermales de Kaswa/Mahagi au Nord-Est de la République Démocratique du Congo

Richard BUDJU<sup>1\*</sup>, Yvonne IBEBEKE<sup>2</sup> et Céline SIKULISIMWA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Département de Biologie-Chimie, Institut Supérieur Pédagogique de Bunia, BP 340 Bunia, République Démocratique du Congo.

<sup>2</sup>Faculté des Sciences, Département de Chimie, Université Pédagogique Nationale, BP 8815, Binza Kinshasa, République Démocratique du Congo.

<sup>3</sup>Faculté des Sciences, Département de Chimie et Industrie/Laboratoire d'hydrochimie, Université de Kinshasa, BP 127 Kinshasa XI, République Démocratique du Congo.

\*Corresponding author; E-mail: [riclemb@gmail.com](mailto:riclemb@gmail.com)

Received: 03-06-2023

Accepted: 15-08-2023

Published: 31-08-2023

### RESUME

Les eaux thermales de Kaswa/Mahagi sont utilisées depuis l'époque ancestrale par les natifs dans des pratiques hygiéniques et sanitaires. Cette étude visait l'amélioration des connaissances sur les aquifères de ces eaux et la détermination de l'origine de leur minéralisation. La combinaison des méthodes hydrochimiques et statistique multi variée a permis de comprendre l'hydrochimie des acquières. Ces sources sont hyper chloruro-sulfatée calcique. L'étude montre que la température, le pH, les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  influencent la minéralisation. Ces ions sont issus des formations évaporitiques et carbonatées de l'encaissant après dissolution des minéraux (TDS : 664-802 mg/L, CE : 932-1230  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Dans les aquifères, le phénomène d'hydrolyse, d'oxydo-réduction et d'échange de base ont été mis en évidence. Ces eaux sont en état de sous-saturation ( $\text{IS} < 0$ ) par rapport aux minéraux d'évaporites (anhydrite, gypse, halite) et de carbonates (calcite, aragonite, dolomie) en différents degrés, traduisant ainsi un temps de séjours assez long au contact de la roche réservoir. Ainsi, la nature de soubassement rocheux et les propriétés que présente l'eau elle-même sont à l'origine de la minéralisation des eaux thermales de Kaswa/Mahagi.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mot clés :** Sources chaudes, hydrogéochimie, aquifères, minéralisation, faciès.

## Hydrogeochemical study of the thermal waters of Kaswa/Mahagi in the North-East of the Democratic Republic of the Congo

### ABSTRACT

The thermal waters of Kaswa/Mahagi have been used since ancestral times by the natives in hygienic and sanitary practices. This study aimed to improve knowledge of the aquifers of these waters and to determine the origin of their mineralization. The combination of hydrochemical and multivariate statistical methods has made it possible to understand the hydrochemistry of the aquifers. These springs are hyper chloruro-calcium sulphated. The study shows that temperature, pH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  ions influence the

mineralization. These ions come from the evaporitic and carbonate formations of the surrounding rock after dissolution of the minerals (TDS: 664-802 mg/L, EC: 932-1230  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). In aquifers, the phenomenon of hydrolysis, oxidation-reduction and base exchange have been demonstrated. These waters are in a state of under-saturation ( $\text{IS} < 0$ ) with respect to evaporitic minerals (anhydrite, gypsum, halite) and carbonates (calcite, aragonite, dolomite) in different degrees, thus reflecting a fairly long residence time in contact with reservoir rock. Thus, the nature of the bedrock and the properties of the water itself are at the origin of the mineralization of the thermal waters of Kaswa/Mahagi.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

**Keywords:** Hot springs, hydrogeochemistry, aquifers, mineralization, facies.

## INTRODUCTION

Les eaux thermales sont des eaux souterraines dont la température à l'émergence est supérieure à la température des eaux des nappes de la région. C'est depuis l'antiquité que l'homme s'y intéresse à cause de ses vertus dont l'hydrothérapie (Duriez, 2006). Elles sont réparties sur l'ensemble de la planète (Madigan et Martinko, 2007). Celles de la République Démocratique du Congo sont concentrées dans la partie Est du pays, région formant le Rift occidental africain et caractérisée par des intenses activités volcaniques (Esseqqat, 2011; PNUD, 2016).

Les sources chaudes de Kaswa/Mahagi sont situées dans le territoire de Mahagi, au Nord du lac Albert et à 55 km au Sud de Mahagi-Port dans le Rift Albertin (Province de l'Ituri) et dans le bassin du Nil. Comme celles de *Lilida* en territoire de Djugu, elles jaillissent des roches des Monts-bleu près du lac Albert et sont localisées près des lignes de fracture qui bordent l'escarpement, aux endroits de dislocation de la croûte terrestre (Mbuluyo & Faidance, 2018; Luse et Makonga, 2019). Les indigènes y effectuent des pratiques hygiéniques et sanitaires associées à la croyance de la divinité depuis l'époque ancestrale. L'évaluation effectuée antérieurement montre que les eaux thermales de Kaswa/Mahagi sont mésothermales et hyperthermales ( $T : 42 - 61^\circ\text{C}$ ) à minéralisation importante ou élevée, neutre ou légèrement acide. Elles sont sulfureuses, le dépôt du soufre étant visible au fond de quelques sources mais souvent balayé par l'eau en saison pluvieuse; elles renferment également de l'hydrogène sulfureux ( $\text{H}_2\text{S}$ ) reconnu par une forte odeur caractéristique d'œuf putréfié. Leur abondance

en ions minéraux est susceptible de leur conférer les propriétés thérapeutiques.

Les roches sont susceptibles de conférer une signature géochimique aux eaux souterraines qui y circulent, dépendant également du temps de contact avec les roches du réservoir (Ligban et al. 2009; Traore et al., 2022). Ainsi, la qualité de l'eau peut être influencée par l'origine géologique de ces ions minéraux ainsi que l'évolution des principaux minéraux contenus dans les eaux thermales. Quelle est alors l'origine de la minéralisation des eaux thermales de Kaswa/Mahagi? Quel est le comportement du réservoir profond vis à vis de ces eaux thermales susceptible d'influencer leur qualité? La présente étude hydrogéochimique a pour but l'amélioration des connaissances sur les aquifères et la détermination de l'origine géologique des éléments chimiques responsables de la charge minérale des eaux thermales de Kaswa/Mahagi. Les informations obtenues seront utiles en vue de la bonne gestion de ces ressources.

## MATERIEL ET METHODES

### Site d'étude

La présente étude a eu lieu à Kaswa dans la Chefferie des Mokambo en territoire de Mahagi, situé dans la Province de l'Ituri en République Démocratique du Congo.

Dans le cadre du contexte hydrogéologique et climatologique, le territoire de Mahagi (Nord du Lac Albert) s'étend sur une vaste région à relief accidenté (1700-1900 m) constitué de hautes montagnes entrecoupées de vallées profondes. A côté des grandes dépressions sédimentaires du Rift occidental, les plaines de Mokambo comme la

plaine de Kasenyi au bord du lac Albert présentent une étendue fort réduite. Toutefois, les sédiments qui forment cette dépression sont allogènes et caractérisés par une double origine : les sédiments fluvio-lacustres de Káiso et les sédiments fluvio-torrentiel de la Semliki (Mbuluyo & Faidance, 2018). Plusieurs cours d'eau, des sources et puits d'eau s'y trouvent. Le climat est du type tropical humide, avec deux saisons distinctes : la saison sèche et la saison de pluie. La température minimum ambiante est de 22°C et la température maximale est de 32°C avec une moyenne annuelle de 26°C. La pluviométrie moyenne annuelle de Mokambo est de 600.8 mm (Omasombo, 2021).

La population d'étude est constituée des eaux thermales de six sources dans la chefferie des Mokambo, groupement Ramogi, précisément au camp des pêcheurs nommé Kaswa, situé sur la rive droite de la rivière Kaswa qui verse ses eaux dans le lac Albert. La localité de Kaswa est située à 2°00'46.678 Nord et 31°04'57.829 Est, à une altitude de 735 m. Les coordonnées des différents sites ont été prélevées grâce à l'appareil GPS marque GARMIN « eTrex®10 », de caractéristique écran monochrome 2,2 '' (Figure 1).

### Echantillonnage

Les échantillons ont été prélevés aux points d'émergence, durant six campagnes menées de 2014 à 2019, aux mois de janvier et avril correspondant respectivement aux saisons sèche et humide. Les analyses ont été faites par pas de 5 jours pour une campagne avec trois essais par paramètre choisis.

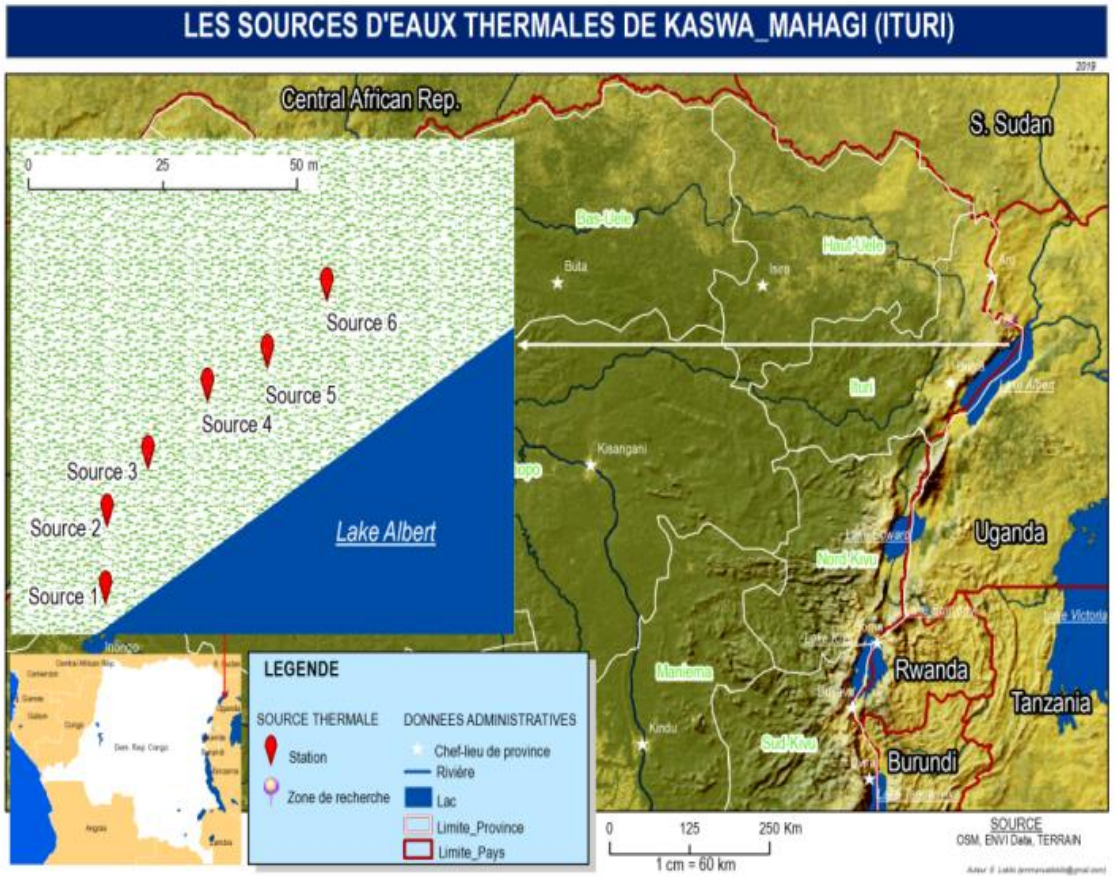
Au total 16 paramètres ont été sélectionnés pour cette étude. La température (T°C), la conductivité électrique (CE), le pH, les solides totaux dissous (TDS) obtenus in situ au moyen de la sonde multi paramètre Water Proof PCST Tespr-35. Un thermomètre de graduation 0-100°C a été également utilisé pour la température. Les concentrations en ions majeurs et mineurs ont été mesurées au laboratoire, le conditionnement étant effectué selon les normes NF EN ISO 5667-3 (2004), les recommandations de Rodier et al. (1984) et

Rodier et al. (2009). Ainsi, les chlorures (Cl<sup>-</sup>) ont été dosés par la méthode de Mohr, les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) par gravimétrie, le calcium (Ca<sup>2+</sup>) par titrimétrie à l'EDTA et le soufre total (S<sup>2-</sup>, HS<sup>-</sup>, S<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>2-</sup>) par l'iodométrie. Les nitrates, les phosphates totaux (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), le magnésium (Mg<sup>2+</sup>), et l'oxygène dissous (in situ) ont été dosés grâce au photomètre HANNA HI 83200 (série 2008) tandis que la concentration en ions hydrogénocarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a été obtenue par le photomètre Palintest 5000, Labo. La teneur en sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>) et Fer (Fe<sup>2+</sup>) a été obtenu au moyen de spectromètre d'absorption atomique flamme (FAAS) marque Perkin Elmer brand, Model Analyst 400.

En vue d'effectuer l'analyse des données par la méthode hydrochimique, l'usage des «Diagrammes» est appropriés (Kouassi et al., 2012). Ainsi, le faciès hydrogéochimique a été obtenu au moyen de diagramme de Piper. Les indices d'échanges de bases (IEB) et les indices de saturation (IS) des minéraux ont été déterminés grâce au Programme PHREEQC.

L'IEB indique le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Si IEB égal à 0, il n'y a pas d'échanges de base. Lorsque IEB inférieur à 0, la roche encaissante libère les ions de Na<sup>+</sup> + K<sup>+</sup> et fixe les ions de Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> de l'eau. Si la valeur de IEB est supérieure à 0, les ions sodium et potassium sont échangés par les ions calcium et magnésium (Schöeller, 1934 cité par Belksier et al., 2016). Les indices de saturation quant à elles sont utilisés pour exprimer la tendance de l'eau vers la dissolution ou la précipitation (Drever, 1997).

Afin de déterminer l'origine de la minéralisation, l'analyse statistique multi variée, notamment la méthode de l'analyse en composante principale (ACP) fournit des résultats appropriés (Ahoussi et al., 2010). Les logiciels Excel 2021, PAST et SPSS ont servi à la détermination des moyennes arithmétiques, écart-types, corrélations et similarités entre les caractéristiques hydrochimiques.



**Légende :** Source 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont notées par K $\alpha$ , K $\beta$ , K $\gamma$ , K $\delta$ , K $\epsilon$  et K $\lambda$  (K = Kaswa).

**Figure 1 :** Site de prélèvement des échantillons d'eau thermique de Kaswa/Mahagi.

**RESULTATS**

**Données hydrochimiques**

Les eaux thermales de Kaswa/Mahagi affichent une conductivité électrique moyenne oscillant entre 932,10±12,45  $\mu$ S/cm et 1230,20±20,27  $\mu$ S/cm notée à K $\lambda$  (sources thermales Kaswa 6) et K $\delta$  (source thermale Kaswa 4) respectivement. Les solides totaux dissous varient entre 664,11±9,02 mg/L enregistré à K $\gamma$  (source thermale Kaswa 3) et 802,34±10,62 mg/L affiché à K $\beta$  (source thermale Kaswa 2). Ces deux paramètres sont liés à la minéralisation globale de l'eau. Leur température moyenne minimale est de 42,98±1,10°C et celle maximale est 59,88±0,21°C observée respectivement à K $\gamma$  et K $\delta$ . La teneur en oxygène dissous de ces eaux reste faible, oscillant entre 0,04±0,01 et

0,27±0,12 mg/L affiché respectivement à K $\epsilon$  (source thermale Kaswa 5) et K $\gamma$  (Tableau 1).

**Faciès hydrochimique**

La détermination des faciès chimiques des eaux est effectuée en faisant recours à plusieurs diagrammes d'hydrochimie dont celui de Piper. Les échantillons d'eau thermique de Kaswa/Mahagi portés dans le diagramme de Piper montrent tous un faciès hyper chloruré et sulfaté calcique (Figure 2).

**Origine de la minéralisation**

*Résultat de la statistique multivariée*

*Matrice des corrélations*

La matrice triangulaire montre que les solides totaux dissous (TDS) sont positivement corrélés avec Ca<sup>2+</sup> (0,75), Mg<sup>2+</sup> (0,86), Cl-

(0,78),  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,64) mais aussi avec T (0,74) et pH (0,68). La corrélation entre TDS et CE (0,35) est positive mais faible. La plus grande corrélation positive est observée entre  $\text{Ca}^{2+}$  et Cl (0,95) renseignant ainsi sur la dissolution du chlorure de calcium. Le  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,69),  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  (0,66) sont aussi fortement corrélés contrairement au  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  (0,42) en corrélation positive faible. Le fer et le soufre total sont positivement corrélés (0,75) ainsi que le soufre total et l'oxygène dissous (0,61). La matrice affiche une corrélation négative forte entre l'oxygène dissous et les sulfates (-0,75) puis entre le soufre total et  $\text{SO}_4^{2-}$  (Tableau 2).

#### Analyse en composantes principales (ACP)

Les facteurs de charges ont été calculés par la diagonalisation de la matrice des corrélations. On obtient ainsi plusieurs tableaux dont seuls les trois premiers sont repris pour l'analyse car ils donnent en eux seuls 87,05% de variance exprimée cumulée, ce qui est suffisant pour traduire l'information recherchée. Ces facteurs sont repartis de la manière suivante : 39,46% pour le premier facteur (F1), 29,95% pour le second facteur (F2) et 17,64% pour le troisième facteur (F3) (Tableau 3).

#### Analyse dans le plan factoriel F1-F2

L'observation des paramètres d'après le schéma de corrélation établi dans le plan des facteurs F1-F2, formant 69,41% de variance, montre l'existence de deux grands groupements à l'intérieur desquels des sous-groupements sont remarquables (Figure 3). La première association est formée des paramètres ci-après : calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Chlore ( $\text{Cl}^-$ ), fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ), température (T), pH et conductivité électrique (CE) formant le premier sous-groupement; magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), sodium ( $\text{Na}^+$ ) et solides totaux dissous (TDS) constituant le second sous groupement tandis que les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et les phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) sont du troisième sous groupement.

Le second groupement comprend trois paramètres en corrélation négative avec les facteurs F1, notamment les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), l'oxygène dissous ( $\text{O}_{2\text{dis}}$ ) et le soufre total ( $\text{S}_{\text{tot}}$ ).

Ces variables sont positivement corrélées entre elles.

#### Analyse dans le plan factoriel F1-F3

L'analyse des variables projetés dans le plan factoriel F1-F3 formant 57,10% de variance montre également la présence de deux grands groupements comme la précédente mais constitués de 4 sous-groupements dont certains paramètres ont subi de permutation dans le plan (Figure 4). Les paramètres dans la projection du plan F1-F2 montre la présence deux groupements. Les ions du groupement 1 sont positivement corrélés avec le TDS, dont certains sont hautement corrélés entre eux. Ils sont ainsi impliqués dans la minéralisation des eaux thermales de Kaswa/Mahagi.

#### Analyse dans le plan factoriel F2-F3

Enfin, l'observation des données hydrochimiques dans le plan factoriel F2-F3 (47,59% de variance exprimée) montre trois grandes associations (Figure 5). La première est constituée de quatre unités statistiques : TDS,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ . La seconde association est formée de deux ions :  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  d'origine évaporitiques. La troisième association est constituée du reste de paramètres où l'on remarque l'unique anion  $\text{Cl}^-$  positionner entre trois cations notamment le  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  positivement corrélés entre eux et avec le facteur F3.

#### Analyse par grappe (Cluster analysis)

Cette analyse permet de montrer les similarités entre les sources thermales. Le dendrogramme révèle la présence de deux grands groupes apparaissant à la corrélation 0,9912, qui sont ensuite ramifiés en des sous-groupes beaucoup plus petits et étroitement corrélés (Figure 6). D'un côté, la grappe montre que les sources thermales  $\text{K}\alpha$  et  $\text{K}\lambda$  affichent les mêmes caractéristiques hydrochimiques et sont très proches de  $\text{K}\epsilon$ . De l'autre côté, ce sont les sources  $\text{K}\beta$  et  $\text{K}\delta$  qui sont identiques et très proches de  $\text{K}\gamma$ .

#### Mise en évidence d'échanges de base

L'indice d'échange de base oscille entre  $0,768 \pm 0,03$  enregistré à  $\text{K}\epsilon$  et  $0,895 \pm 0,01$  noté à  $\text{K}\delta$  (Tableau 4). On remarque que l'indice d'échanges de bases de tous les échantillons

analysés est positif.

**Equilibre eaux-minéraux dans les aquifères**

L'étude montre que les indices de saturation des minéraux obtenus sont tous négatifs (Tableau 5). On observe que l'anhydrite et le gypse affiche les indices de saturation plus élevés comparativement aux autres, oscillant entre -0,52 observé à Kδ et -0,86 noté à Kγ dans le cas de l'anhydrite et entre -0,54 enregistré à Kδ et -0,74 à Kγ dans le cas de Gypse. La plus faible valeur est

enregistrée dans le cas d'halite dont IS se situe entre -7.44 noté à Kβ, Kδ et -7,73 enregistré à Kγ.

La représentation de l'indice de saturation de gypse (ISG) en fonction de l'indice de saturation de la calcite (ISC) des eaux thermales de Kaswa/Mahagi montre l'alignement des points en progression linéaire de droite de régression  $ISG = 0,2235 \times ISC - 0,2204$  (coefficient de corrélation = 0,91), ISG et ISC étant négatifs.

**Tableau 1 :** Moyennes arithmétique et écart-type des paramètres.

	<u>Kaswa α</u>	<u>Kaswa β</u>	<u>Kaswa γ</u>	<u>Kaswa δ</u>	<u>Kaswa ε</u>	<u>Kaswa λ</u>
Paramètres	M±σ	M±σ	M±σ	M±σ	M±σ	M±σ
T (°C)	45,68±0,19	56,7±0,18	4,98±1,10	59,88±0,21	57,38±1,61	45,45±1,62
CE(μS/cm)	981±19,03	1202,95±31,25	1085,3±28,74	1230,2±20,27	1033,93±9,68	932,1±12,45
pH	6,98±0,04	7,00±0,08	6,45±0,07	7,09±0,67	6,95±0,04	7,13±0,01
O <sub>2dis</sub> (mg/L)	0,21±0,10	0,09±0,01	0,27±0,12	0,11±0,02	0,04±0,01	0,08±0,01
TDS (mg/L)	798,45±10,01	802,34±10,62	664,11±9,02	798,41±13,21	750,26±11,28	794,06±10,74
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	14,45±3,47	10,03±4,25	15,95±5,03	12,90±4,95	12,85±6,19	20,63±7,43
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	0,85±0,59	1,15±0,33	1,03±0,51	0,78±0,49	0,77±0,53	1,59±0,34
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	178,18±29,26	147,20±33,51	203,65±42,64	190,10±13,82	172,80±13,22	144,72±15,01
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	420,10±28,44	445,2±20,31	423,05±29,56	489,55±21,22	533,98±23,05	469,13±26,16
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	2,39±0,03	2,40±0,18	2,4±0,08	2,40±0,03	2,40±0,02	3,47±2,10
Na <sup>+</sup> (mg/L)	4,06±1,42	3,83±1,30	4,27±0,94	5,12±1,27	4,21±1,85	4,65±0,62
K <sup>+</sup> (mg/L)	3,15±0,64	2,49±0,55	1,8±0,91	3,27±0,48	1,57±0,45	2,91±0,27
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	49,63±14,54	75,33±28,09	31,3±17,27	112,20±18,4	190,23±25,13	52,55±7,99
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	28,83±6,98	47,55±24,0	22,95±13,2	55,70±32,39	66,25±20,43	52,55±8,27
Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	4,48±1,10	4,08±0,85	4,22±0,77	4,97±1,02	4,21±1,34	4,19±0,91
S <sub>tot</sub> (mg/L)	55,68±10,3	46,8±9,25	59,43±7,29	60,58±7,15	51,83±4,68	50,10±7,83

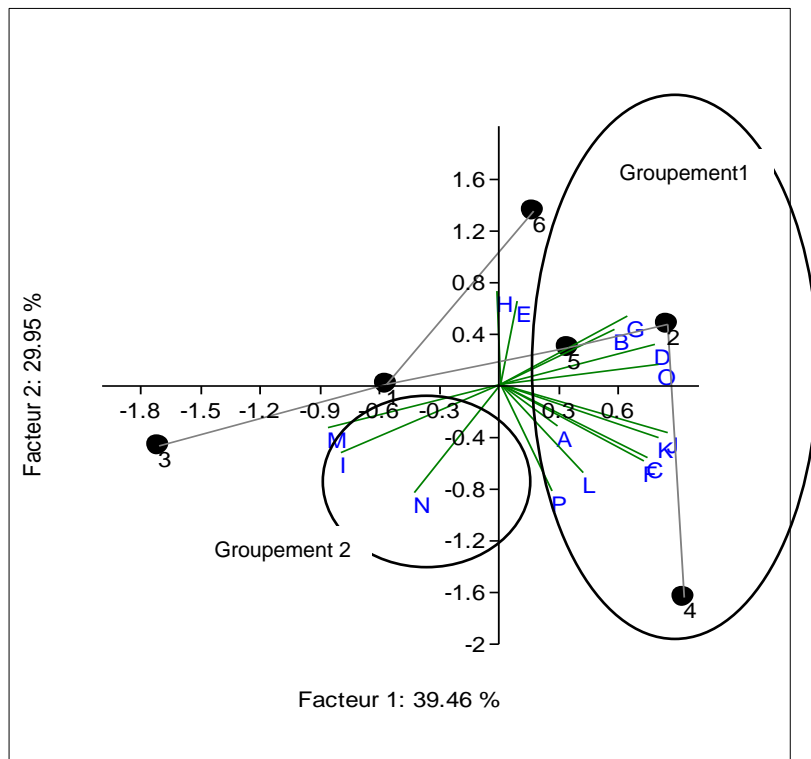
Légende : M = moyenne arithmétique ; σ = écart-type  
S<sub>tot</sub> = soufre total



<b>Fe</b>	0,29	<b>0,74</b>	-	<b>0,72</b>	0,11	-0,26	<b>0,73</b>	-0,17	0,36	0,35	0,39	1		
<b>O<sub>2dis</sub></b>	0,56	0,14	0,86	-0,48	-0,59	-0,30	0,33	-0,75	0,69	-0,66	0,07	0,07	1	
<b>S<sub>tot</sub></b>	0,42	0,44	0,68	0,23	-0,57	-0,36	0,20	-0,70	0,14	-0,10	0,20	<b>0,73</b>	<b>0,61</b>	1

**Tableau 3:** Valeurs propres de l'ACP.

Facteurs (F)	Valeur Propre	% Total de la variance exprimée	Valeur propre cumulée	Variance cumulée
F1	6,31	39,46	6,31	39,46
F2	4,79	29,95	11,1	69,41
F3	2,82	17,64	13,92	87,05



**Légende :**

Groupement 1: A: K<sup>+</sup>, B: Na<sup>+</sup>, C: Ca<sup>2+</sup>, D: Mg<sup>2+</sup>, E: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F: Cl<sup>-</sup>, G: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H: PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, J: T, K: pH, L: CE, O: TDS, P: Fe<sup>2+</sup>  
Groupement 2: I: NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, M: O<sub>2dis</sub>, N: S<sub>tot</sub> .

**Figure 3 :** Analyse dans le plan factoriel F1-F2.



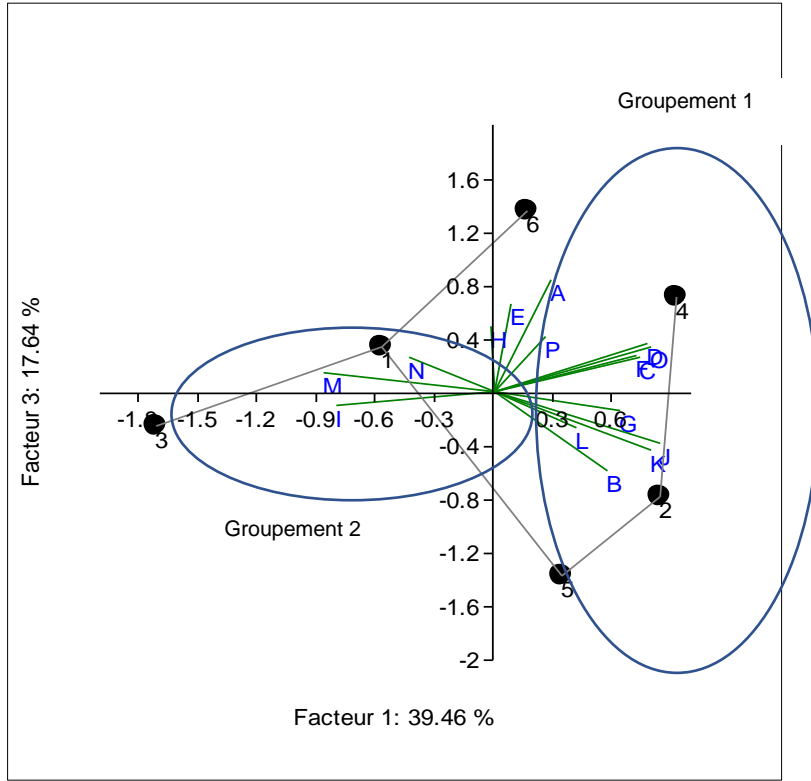


Figure 4 : Analyse dans le plan factoriel F1-F3.

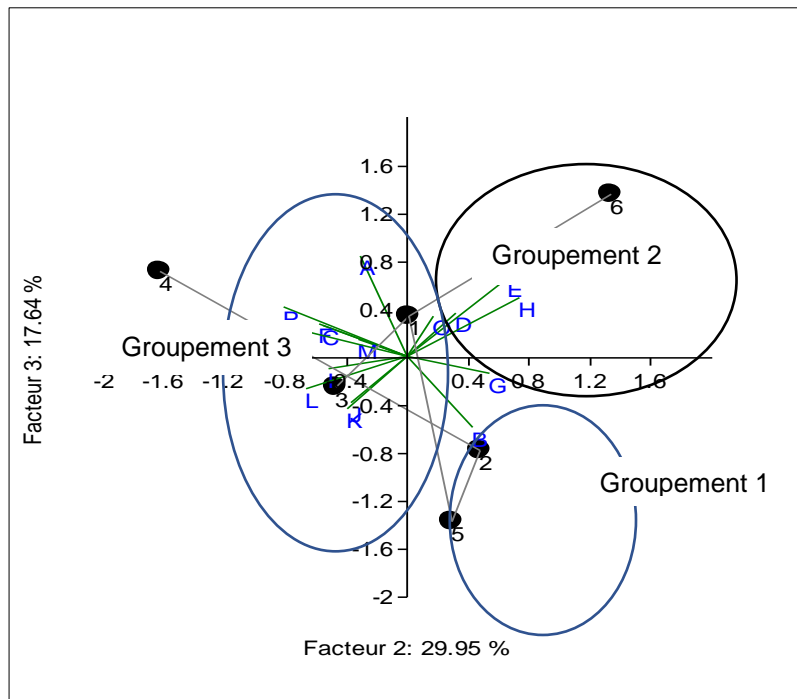
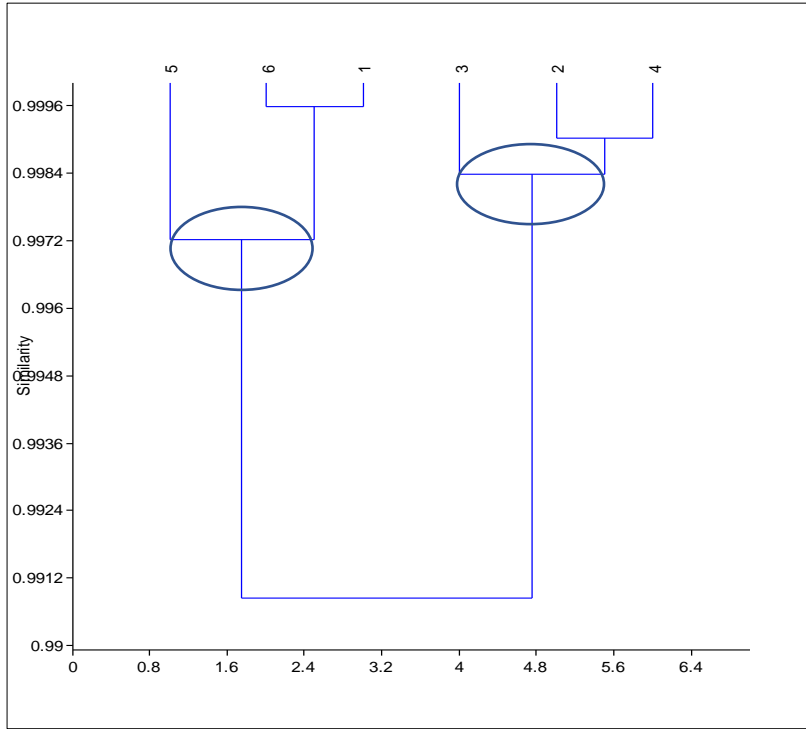


Figure 5 : Analyse dans le plan factoriel F2-F3.



Légende : 1 = K $\alpha$ , 2 = K $\beta$ , 3 = K $\gamma$ , 4 = K $\delta$ , 5 = K $\epsilon$ , 6 = K $\lambda$

**Figure 6:** Dendrogramme des caractéristiques hydrochimique des sources thermale de Kaswa/Mahagi.

**Tableau 4 :** Indices d'échanges de base ((IEB) des eaux thermale de Kaswa/Mahagi.

Site de prélèvement	K $\alpha$	K $\beta$	K $\gamma$	K $\delta$	K $\epsilon$	K $\lambda$
IEB	0,855	0,848	0,839	0,895	0,768	0,821
$\sigma$	0,02	0,04	0,01	0,01	0,03	0,05

**Tableau 5 :** Indices de saturation des minéraux et du CO<sub>2dis</sub> des eaux thermale de Kaswa/Mahagi.

Paramètres	K $\alpha$	K $\beta$	K $\gamma$	K $\delta$	K $\epsilon$	K $\lambda$
IS Anhydrite (CaSO <sub>4</sub> )	-0,76	-0,59	-0,86	-0,52	-0,57	-0,74
IS Aragonite (CaCO <sub>3</sub> )	-2,42	-1,73	-2,29	-1,53	-1,68	-2,07
IS Brucite ( Mg(OH) <sub>2</sub> )	-5,19	-3,92	-5,51	-3,61	-3,91	-5,2
Is Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	-2,29	-1,60	-2,16	-1,41	-1,56	-1,94
IS CO <sub>2</sub> (g)	-3,25	-3,57	-3,24	-3,61	-3,55	-3,09
IS Dolomite (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	-3,39	-2,98	-4,24	-2,69	-2,97	-3,66
IS Epsomite (MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)	-3,73	-3,82	-3,87	-3,92	-3,88	-3,71

IS Magnésite ( $MgCO_3$ )	-2,72	-2,30	-2,90	-2,17	-2,30	-2,57
IS Gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )	-0,66	-0,58	-0,74	-0,54	-0,67	-0,64
IS Halite ( $NaCl$ )	-7,68	-7,44	-7,73	-7,44	-7,47	-7,54

**Légende** : IS = indice de saturation

## DISCUSSION

L'étude hydrogéochimique des eaux thermales de Kaswa/Mahagi est basée principalement sur les paramètres hydrochimiques et l'analyse des corrélations existant entre ces paramètres. Ces eaux ont subi une minéralisation importante, les valeurs de conductivité électrique (CE : 932-1230  $\mu S/cm$ ) se situant dans la tranche allant de 833 à 10 000  $\mu S/cm$  considérant la classification suggérée par Rodier et al. (2009). Les fortes corrélations positives entre TDS et  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , température et pH montrent que la salinité des eaux thermales de Kaswa/Mahagi est augmentée principalement par ces paramètres, de ce fait participent à la minéralisation (Tableau 2).

L'hydrofaciès de ces eaux thermales est du type hyper chloruro-sulfaté. Elles sont également enrichies en soufre. Le même faciès chimique peut faire supposer que les eaux ont un réservoir profond commun et que leurs compositions varient lors de leurs trajets ascendant (Lakdhar et al., 2007). Cependant une analyse approfondie par des méthodes statistiques appropriées révèlent que ces thermales sont issues de deux roches mères différentes constituées à leurs tours de plusieurs groupes de composés chimiques tel qu'affiché par l'analyse en composante principale et des dendrogrammes des similarités (cluster analysis) des paramètres hydrochimiques. En plus, la charge minérale issue de l'encaissant subit des dilutions lors de leur remonté vers la surface, suite à des mélanges dans de proportions variables avec les eaux météorites d'origine superficielle susceptibles de modifier leurs compositions (Lakdar et al., 2007). La diversité observée entre les sources thermales de Kaswa/Mahagi

peut être expliquée en partie par ce phénomène.

L'étude par analyse en composante principale révèle que la minéralisation des eaux thermales de Kaswa/Mahagi est contrôlée principalement par les ions issues des formations évaporitiques ( $CaCl_2$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ,  $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $Na_2SO_4$  et  $K_2SO_4$ ) et puis par les formations carbonatées ( $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $CaMgCO_3$ ) étant donné leur présence en faible concentration. Ceci permet de mettre en évidence le phénomène d'hydrolyse subi par les minéraux afin de générer les ions, ce phénomène étant favorisé par les conditions physico-chimiques du milieu dont la température et le pH.

Par contre, une autre association composée du Soufre total, de l'Oxygène dissous et des ions nitrates permet de mettre en évidence les réactions d'oxydo-réduction. Les deux paramètres ( $NO_3^-$  et  $O_2dis$ ) peuvent être d'origine anthropique. Le soufre total provient d'une autre roche, notamment les volcanites présentes dans cette région du Rift Albertin d'après les résultats obtenus par Luse et Makonga (2019) ayant mené une étude géochimique des eaux thermales de Lilida en territoire voisin de Djugu. En effet, le soufre peut réagir avec l'oxygène pour former les sulfates, les thiosulfates ou les sulfures en présence des thiobacter et la réaction inverse est également évidente. Les nitrates quant à eux peuvent être réduits en nitrites ou en azote gazeux ou transformés en azote ammoniacal en présence des microorganismes.

Le  $Fe^{2+}$  et le  $S_{tot}$  se trouvant des fois dans un même groupement (Figure 5) montrent que ces deux ions sont également issus de la pyrite. En effet, les espèces du soufre sont issues pour une partie des sulfates des eaux

météoriques et pour l'autre du lessivage de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) qui fournit de l'hydrogène sulfuré ( $\text{HS}^-$ ), du sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et des traces de thiosulfates ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) (Duriez, 2006).

La détermination de l'indice d'échange de base (IEB) a montré que, dans le cas des eaux thermales de Kaswa/Mahagi, les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de ces eaux thermales sont échangés par les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'encaissant et cet équilibre dépend également de la particularité et des conditions de l'encaissant. Bouziane et Labadi (2009), notent qu'il est évident que la variation spatiale des éléments chimiques ne peut s'expliquer uniquement par le phénomène d'échange de base, mais aussi par la particularité de l'aquifère concerné et les spécificités des conditions hydrogéologiques du réservoir peuvent jouer un rôle aussi important dans la naissance de réactions et d'équilibres chimiques.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Ahoussi et al. (2012) à propos des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire qui affichait également deux groupements dont l'un renfermait des variables impliquant le phénomène d'hydrolyse acide et l'autre celui d'oxydo-réduction.

Les échantillons d'eaux thermales de Kaswa/Mahagi sont tous sous-saturés vis-à-vis des minéraux étudiés ( $\text{IS} < 0$ ) bien qu'à différents degrés. S'agissant des minéraux présents dans les eaux thermales de Kaswa/Mahagi, leur tendance à la dissolution peut-être expliquée entre autre par leur séjour ou temps de contact assez long avec les eaux thermales, comme le note également Traore et al. (2022) au sujet des eaux souterraines de Man en Côte d'Ivoire. L'évolution de l'indice de saturation de gypse (ISG) en fonction de l'indice de saturation de la calcite (ISC) présentent également une sous-saturation à la fois en gypse et en calcite, les indices de saturations de la calcite étant plus inférieurs par rapport à ceux du gypse ( $\text{ISC} < \text{ISG} < 0$ ).

### Conclusion

Cette étude hydrogéochimique réalisée sur les eaux thermales de Kaswa/Mahagi a permis de mieux comprendre le comportement

de leurs aquifères et l'origine de leur minéralisation. Ces sources thermales affichent toutes le même faciès chimique du type chloruré et sulfaté. Leur minéralisation est contrôlée principalement par les ions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  liés aux évaporites, mais aussi par la température et le pH de l'eau, positivement corrélés avec le TDS. Trois types de phénomènes favorisant la minéralisation ont été mis en évidence notamment l'hydrolyse des minéraux, oxydo-réduction et échange de base dans l'aquifère. Les éléments chimiques des eaux thermales de Kaswa/Mahagi proviennent de deux roches-mères différentes dont chacune contient plusieurs familles de composés chimiques. L'étude montre que les minéraux étudiés sont toutes à l'état de sous-saturation, traduisant le temps de séjours assez long des eaux thermales au contact des minéraux. Ainsi l'origine et le processus d'acquisition de la charge minérale des eaux thermales de Kaswa/Mahagi dépendent de la nature du soubassement rocheux présenté et les facteurs internes liés à l'eau thermale elle-même. Cette connaissance de comportement des aquifères et de l'origine de la minéralisation permettra la bonne gestion de ces ressources au profit des utilisateurs. L'influence de la variation saisonnière sur la minéralisation fera l'objet de la prochaine étude.

### CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts tant pour les données que pour le travail dans son ensemble.

### REMERCIEMENTS

Nos reconnaissances s'adressent aux Responsables de Laboratoire de Chimie de l'ISP/Bunia, le Laboratoire d'hydrochimie du Département de chimie et Industrie/Faculté des Sciences de l'Université de Kinshasa et Uganda Industrial Research Institute pour avoir mis à notre disposition les matériels, produits chimiques nécessaires ainsi que les outils de traitement des données.

### CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

L'auteur correspondant RB a assuré la conception du présent travail et la rédaction du

manuscrit, YI contribué à l'encadrement du travail et la correction du manuscrit. L'auteur CS a assuré, en plus d'encadrement, la supervision du travail dans son ensemble et la correction du manuscrit.

## REFERENCES

- Ahoussi KE, Soro N, Koffi YB, Soro G, Biémi J. 2010. Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire: cas de la région d'Abidjan-Agboville. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **4**(3): 782-797. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v4i3.60513>
- Ahoussi KE, Youan TM, Loko S, Adja MG, Lasm T, Jourda JP. 2012. Etude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fracture du socle Paléo-protérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire: Cas de la région de Bondoukou. *Afrique SCIENCE*, **08** (3) : 51-68.
- Belksier MS, Chaab S, Abour F. 2016. Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution. *Rev. Sci. Technol., Synthèse*, **32**: 42 -57.
- Bouziiane MT, Labadi A. 2009. Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie). *European Journal of Scientific Research*, **25**(4): 526-537.
- Drever JF. 1997. *The Geochemistry of Natural Waters* (3<sup>rd</sup> edn). PrenticeHall-INC: New York.
- Duriez A. 2006. Origine et processus de minéralisation d'eau thermale en milieu continental méditerranéen : cas du système géothermal des Thermopyles (Grèce). PhD Thèse, Université Paris Sud 11, Paris, p.72.
- Essekat H. 2011. Les énergies renouvelables en République démocratique du Congo. Pnue : 45.
- Kouassi AM, Ahoussi KE, Koffi YB, Aké YA, Biémi J. 2012. Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6**(1): 504-518. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.45>
- Lakdhar A, Ntarmouchant A, Beqqali RM. 2007. Détermination de l'origine de la minéralisation des eaux thermale de Moulay Yacoub par des approches géologiques et géochimiques. *Revue des Energies Renouvelables CER'07* Oujda : 81-84.
- Ligban R, Gone LD, Kamagate B, Saley MB, Biémi J. 2009. Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **3**(1) : 38-47. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v3i1.42733>
- Luse B, Makonga M. 2019. Geochemical Analysis of Lilida geothermal spring. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, **88** :44-55. DOI: <http://dx.doi.org/10.25518/0037-9565.8477>
- Madigan M, Martinko J. 2007. *Biologie des Micro-organismes* (11<sup>e</sup> edn). PEF : Paris.
- Mbuluyo M, Faidance M. 2018. Carte morphostructurale de la plaine de Kasenyi (Ituri – RD Congo). *Geo-Eco-Trop.*, **42** (1) : 1-18.
- Omasombo T. 2021. Ituri. Terres et entités sous tension. Africa Museum, Tervuren, Belgique.
- PNUD. 2016. *Atlas des Energies Renouvelables de la RDC* (2<sup>nd</sup> Edn). Ministère de l'Environnement et Développement Durable ; 44-45.
- Rodier J, Legube B, Merlet N. 1984. *L'analyse de l'Eau* (7<sup>e</sup> edn). Dunod : Paris.
- Rodier J, Legube B, Merlet N. 2009. *L'analyse de l'Eau*, (9<sup>e</sup> edn). Dunod : Paris.
- Traore A, Soro TD, Dibi B, Yao LJ. 2022. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du département de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **16**(1): 498-514. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v16i1.40>