

Evaluation de la qualité physicochimique des eaux des forages des quartiers Bantounka et Nassouroulaye, Commune de Lambanyi Conakry.

Résumé

Cette étude porte sur l'évaluation de la qualité physico chimique et microbiologique des eaux des forages dans les quartiers Nassouroulaye et Bantounka, situés dans la commune de Lambanyi, Conakry. Dans ce contexte urbain marqué par une insuffisance des infrastructures d'approvisionnement en eau potable, les populations recourent largement aux eaux souterraines pour leurs besoins domestiques. L'objectif de cette étude est de caractériser la qualité des eaux des forages de cette localité. La méthodologie adoptée repose sur l'échantillonnage de treize (13) forages réalisés au cours de deux campagnes entre septembre 2024 et juin 2025. Les paramètres physiques ont été mesurés in situ, tandis que les analyses chimiques des ions majeurs, la microbiologie et les métaux dissouts ont effectuées en laboratoire. L'interprétation des données a été réalisé à l'aide du diagramme de Piper, d'analyses des corrélations et l'Analyse des Composantes principales (ACP). Les résultats montrent que les eaux présentent une acidité marquée par environ 77% des échantillons. La minéralisation est modérée et est conforme aux normes de potabilité de l'eau. Les concentrations en ions majeurs sont globalement faibles et respects les seuils recommandés. Toutefois, une teneur élevée en nitrates a été observée dans un forage. L'analyse hydrochimique met en évidence deux faciès : les eaux chlorurées et sulfatées calciques et magnésiennes et les eaux chlorurées sodiques et potassiques. Les analyses statistiques révèlent des corrélations significatives entre la conductivité électrique, les chlorures, les nitrates et le calcium, traduisant une influence combinée des processus naturels et des apports anthropiques l'ACP met en évidence une hétérogénéité spatiale de la qualité des eaux. Sur le plan microbiologique, la présence des coliforme fécaux (*Escherichia coli*) dans plusieurs échantillons constitue un risque sanitaire majeur. Bien que les eaux étudiées présentent une qualité chimique globalement acceptable, leur acidité et leur contamination microbiologique limite leur potabilité.

Mots clés : Qualité des eaux souterraines ; Forages domestiques ; Paramètres physico-chimique ; Contamination microbiologique ; *Escherichia coli* ; Diagramme de Piper ; Analyse en Composants Principales (ACP)) ; Minéralisation ; Pollution anthropique ; Lambanyi (Conakry).

Abstract

This study focuses on the evaluation of the physicochemical and microbiological quality of borehole water in the districts of Nassouroulaye and Bantounka, located in the municipality of Lambanyi, Conakry. In this urban context characterized by insufficient drinking water supply infrastructure, populations rely heavily on groundwater for their domestic needs. The objective of this study is to characterize the quality of borehole water in this locality. The methodology adopted is based on the sampling of thirteen (13) boreholes during two campaigns conducted between September 2024 and June 2025. Physical

parameters were measured in situ, while chemical analyses of major ions, microbiological analyses, and dissolved metals were carried out in the laboratory. Data interpretation was performed using the Piper diagram, correlation analyses, and Principal Component Analysis (PCA). The results show that the waters exhibit marked acidity, with approximately 77% of the samples. Mineralization is moderate and complies with drinking water standards. Concentrations of major ions are generally low and meet the recommended thresholds. However, a high nitrate concentration was observed in one borehole. Hydrochemical analysis reveals two main facies: calcium–magnesium chloride and sulfate waters, and sodium–potassium chloride waters. Statistical analyses reveal significant correlations between electrical conductivity, chlorides, nitrates, and calcium, indicating a combined influence of natural processes and anthropogenic inputs. PCA highlights spatial heterogeneity in water quality. From a microbiological perspective, the presence of fecal coliforms (*Escherichia coli*) in several samples constitutes a major health risk. Although the studied waters show overall acceptable chemical quality, their acidity and microbiological contamination limit their potability.

Keywords : Groundwater quality; Domestic boreholes; Physicochemical parameters; Microbiological contamination; *Escherichia coli*; Piper diagram; Principal Component Analysis (PCA); Mineralization; Anthropogenic pollution; Lambanyi (Conakry).

Introduction

L'eau constitue une ressource essentielle à la vie et au développement socio-économique des populations. Dans les zones urbaines en forte croissance, notamment dans les pays en développement, l'accès à une eau potable de qualité demeure un défi majeur. À Conakry, et particulièrement dans la commune de Lambanyi, l'insuffisance des infrastructures publiques d'approvisionnement en eau conduit les populations à recourir massivement aux forages domestiques comme principale source d'eau de consommation.

Cependant, bien que ces ressources souterraines soient souvent perçues comme naturellement protégées, elles restent vulnérables à divers processus de contamination, tant d'origine naturelle qu'anthropique. En milieu urbain, la pression démographique, l'urbanisation non planifiée, l'absence de systèmes d'assainissement adéquats et la proximité entre les forages et les sources potentielles de pollution (latrines, fosses septiques, rejets domestiques) favorisent la dégradation progressive de la qualité des eaux souterraines.

L'évaluation de la qualité des eaux souterraines repose sur l'analyse combinée de paramètres physico-chimiques et microbiologiques, permettant de caractériser leur aptitude à la consommation humaine conformément aux normes établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, la température, les ions majeurs (nitrates, sulfates, chlorures, calcium, etc.) ainsi que la présence de micro-organismes indicateurs de contamination fécale (*Escherichia coli*) constituent des indicateurs essentiels pour apprécier la qualité de ces eaux.

Dans le contexte présent, cette étude vise à analyser la qualité physico chimique et microbiologique des eaux des forages domestiques dans les quartiers Bantounka et Nassouroulaye. Elle s'inscrit dans une démarche de compréhension des processus hydrochimiques, d'identification des sources potentielles de contamination et d'évaluation des risques sanitaires associés à l'utilisation de ces eaux.

Matériel et méthodes

Le prélèvement d'échantillon d'eau est une tâche complexe qui demande beaucoup de vigilance. Il est indispensable que l'échantillon soit homogène, représentatif et obtenu sans perturber les propriétés physico-chimiques de l'eau (Arif et Meriouma, 2023). Il est considéré comme première phase de l'analyse chimique et elle représente la fondation pour l'étude des eaux souterraines. Donc il faut prendre toutes les précautions pour avoir un échantillonnage représentatif (Saber, 2022). L'échantillonnage des eaux souterraines se fait par la préparation du prélèvement et se présente comme suit : le prélèvement proprement dit, le conditionnement de l'échantillon, ainsi que son stockage jusqu'au moment où l'eau est analysée (Diallo et Konaté, 2023). Chacune de ces étapes est importante pour assurer la fiabilité des résultats d'analyse. Des bouteilles en plastique de volume uniforme ont été utilisées pour collecter les échantillons. Toutes les bouteilles ont été nettoyées à l'eau distillée et rincées par l'eau à prélever. Des points de prélèvement ont été ciblés dans les différents quartiers de la zone d'études. Les enquêtes et les relevés des coordonnées des différents forages ont permis d'échantillonner sur un ensemble treize (13) forages domestiques.

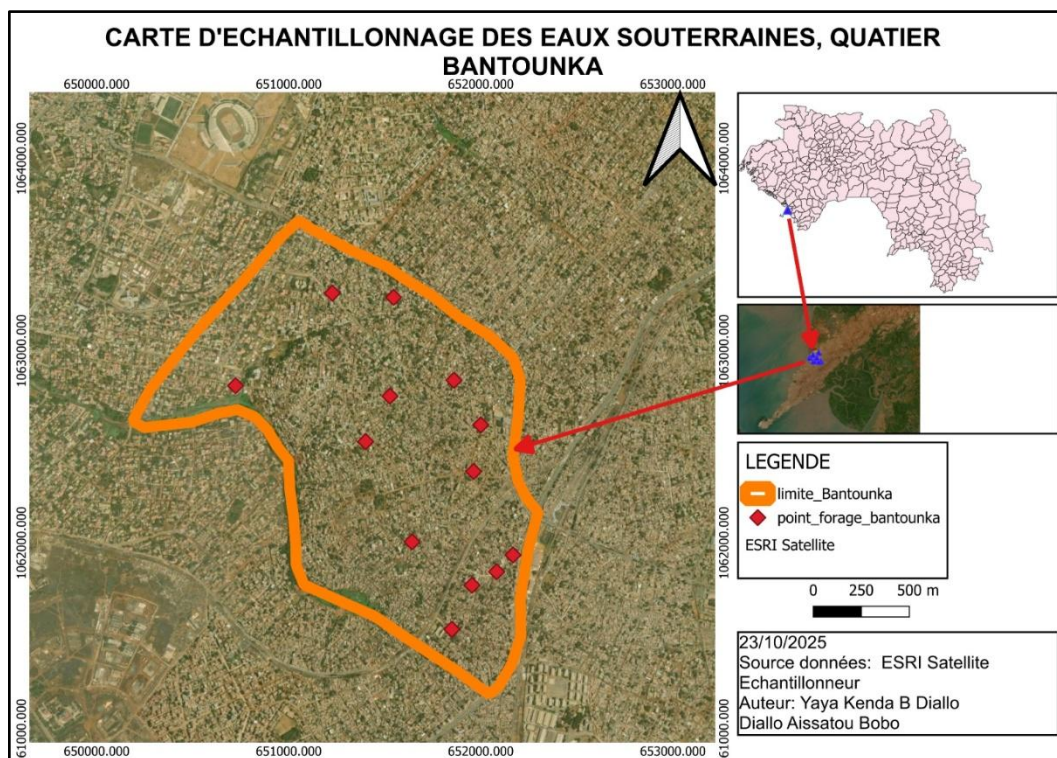


Figure 1 : Carte d'échantillonnages des eaux souterraines de la zone d'études

Le processus d'échantillonnage d'une eau souterraine implique la préparation du prélèvement, le prélèvement lui-même, le conditionnement de l'échantillon et son stockage jusqu'à l'analyse de l'eau. Il est crucial de respecter chacune de ces étapes afin de garantir la fiabilité des résultats d'analyse (Thierrinet *al.*, 2003). La préparation des échantillons est une étape relativement facile, la méthode la plus simple consiste à nettoyer et à remplir des flacons stériles préparés au laboratoire avec de l'eau souterraine provenant directement du tubage en sortie de puits. Le GPS, AvenzaMaps, les bocaux plastiques et le pH-mètre de poche Combo ont servi de matériel de terrain pendant le travail.

Méthodes d'analyse

La présente étude est essentiellement basée sur l'analyse des fiches techniques de 13 forages d'eau couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Les paramètres physiques (pH, de la conductivité électrique (CE), de la température et des TDS) ont été mesurés in situ. L'appareillage utilisé sur le terrain est le pH-mètre COMBO. La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre HANNA. En ce qui concerne les paramètres chimiques, cette étude

s'est appuyée sur un certain nombre d'éléments chimiques qui sont Nitrates, Chlorures, Sulfates, Fluorures, Nitrite, Phosphates, Aluminium, Arsenic, Baryum, Calcium, Cadmium, Chrome, Cuivre, Fer, Potassium, Magnésium, Sodium, Nickel, Plomb, Zinc. Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été recueillis dans des flacons en polyéthylène d'un litre pour être analysés au Laboratoire Environnement de la Compagnie des Bauxites de Guinée(CBG). Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre DR 6000 de type HACH et un spectromètre d'émission optique ICP-OES. Les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent de deux campagnes d'échantillonnages entre septembre 2024 et juin 2025 dans deux quartiers(Nassouroulaye et Bantounka) de la Commune de Lambanyi, Conakry. L'alcalinité, la dureté et le dioxyde de carbone dissout ont été mesuré par titrage(Mimouni, 2020).

Analyse au laboratoire

Les paramètres : Nitrates, Chlorures, Sulfates, Fluorures, Nitrite, Dioxyde de carbone ont été analysé par le spectrophotomètre DR 6000.



Figure 2 : Spectromètre DR6000

Tandis que les cations comme : Aluminium, Arsenic, Baryum, Calcium, Cadmium, Chrome, Cuivre, Fer, Potassium, Magnésium, Sodium, Nickel, Plomb et Zinc ont été analysés par le spectromètre d'émission optique ICP-AVIO.

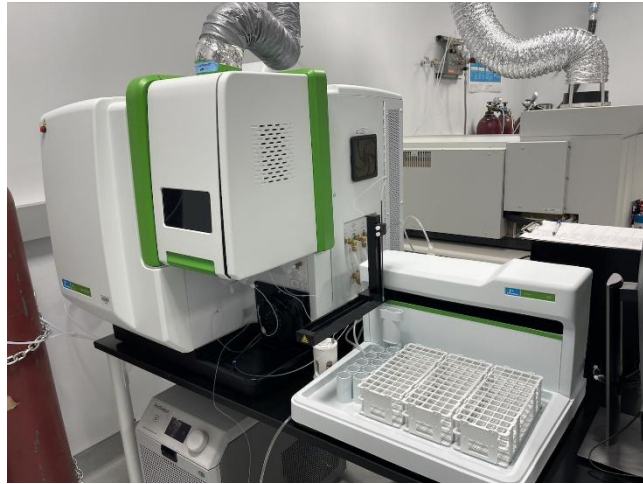


Figure 3 : Spectromètre d'émission optique ICP

Pour la caractérisation et la classification des eaux souterraines de la zone d'études, nous avons utilisé les diagrammes de Piper.

Résultats et discussion

Paramètres physiques

Les paramètres physiques suivants (pH, température et conductivité électrique) ont été déterminés puis comparés aux normes OMS de qualité de l'eau potable.

Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH de l'eau renseigne sur son acidité et son alcalinité. Habituellement, les valeurs de pH se situent entre **6,5 et 8,5** dans les eaux naturelles selon l'OMS. Le pH des eaux souterraines de la zone d'études varie entre 5,80 et 9,33, **Figures 3**, soit une moyenne de 6,66. Les plus petites valeurs du pH ont été relevées recueillies aux forages F2 et F6 et la plus grande au F4. Dans la zone d'études seulement deux forages présentent des eaux qui sont dans les normes de l'OMS dictées plus haut soit 15,38%. Environ 77% des eaux des forages sont acides soit 10 forages sur 13.

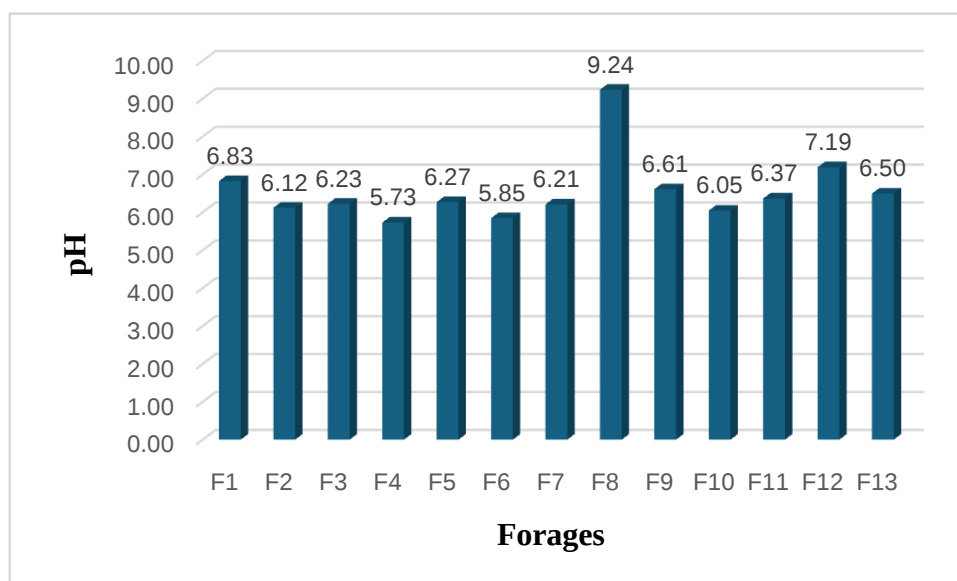


Figure 4 : Variation du pH dans les eaux de la zone d'études.

Température

Selon (OMS, 2017) la température a un impact sur l'acceptabilité d'un certain nombre de constituants inorganiques et de contaminants chimiques qui peuvent affecter le goût. Une température élevée de l'eau stimule la croissance des micro-organismes et peut accroître les problèmes liés au goût, à l'odeur, à la coloration et à la corrosion. La température des eaux souterraines mesurées dans la zone variait entre 25,2°C au forage F12 à 28,9 °C au forage F9. La température moyenne des eaux des forages de la zone d'études est 26,94°C.

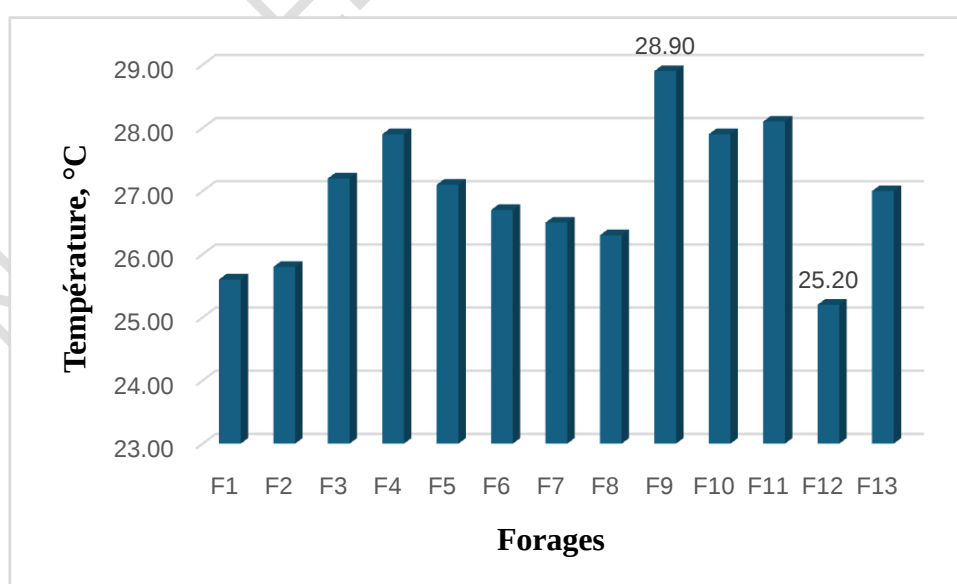


Figure 5 : Variation de la température des eaux souterraines de la zone d'études

Conductivité électrique

La conductivité électrique des eaux de la zone d'études varie entre 153,00 et 447,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La totalité des échantillons présente des valeurs de la conductivité inférieure à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce qui démontre que les eaux de ces forages ont une minéralisation se trouvant dans les normes requises par l'OMS. Avec une moyenne de 313,47 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

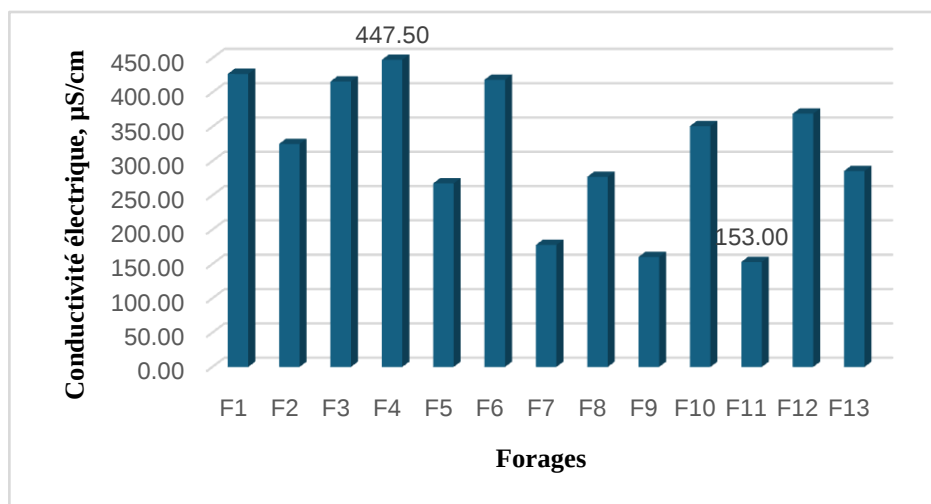


Figure 6 : variation de la conductivité électrique des eaux de la zone d'étude

Analyse des ions majeurs

Sulfates (SO_4^{2-})

Les distributions sont étendues entre 0 aux forages F7, F8, F9 et F11 avec une concentration de 1 mg/l au forage F1 à 28,5 mg/l au forage F6. Ces valeurs de sulfate présents dans les eaux des forages de la zone d'études sont à une concentration inférieure à 500 mg/l, norme établie par l'OMS sur la potabilité de l'eau de consommation. D'où en termes de sulfates, ces eaux ne présentent aucun effet indésirable pour leurs consommations.

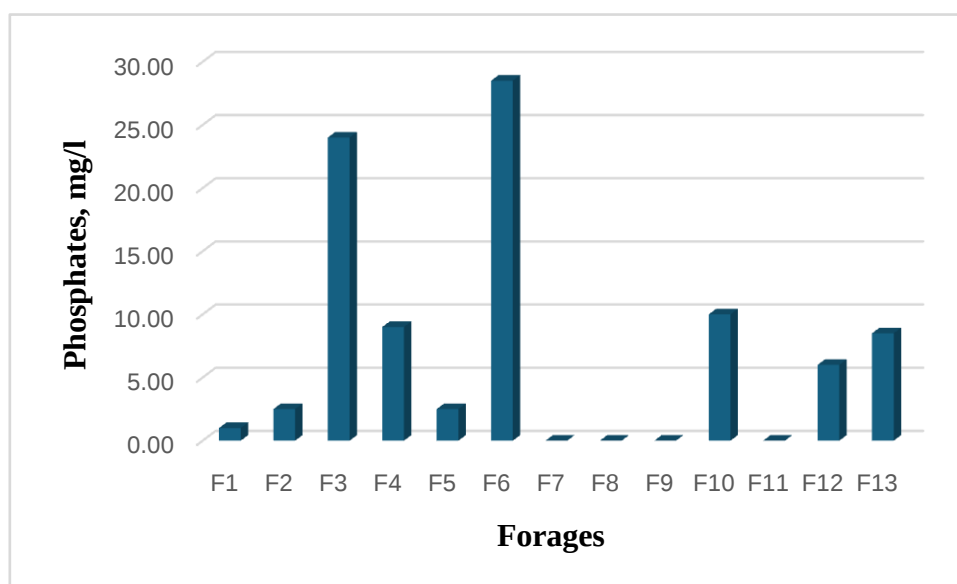


Figure 7 :valeurs de concentration des phosphates dans les eaux des forages de la zone d'études.

Les nitrates

Les nitrates constituent le stade final de l'oxydation de l'azote organique, leur présence dans une eau atteste que le processus d'autoépuration est déjà entamé(H. Wanget *al.*, 2024; Y. Wang et *al.*, 2019). L'activité humaine accélère le processus d'enrichissement en cet élément sur les sols subissant l'érosion, ce qui provoque l'infiltration des eaux usées dans les aquifères(Wei et *al.*, 2024). La zone étudiée et comme il est indiqué les teneurs en nitrates variaient entre 0,6 mg/Let 58,25 mg/, figure 3.Dans la zone d'études, les résultats d'analyses obtenus ne posent pas de problèmes par rapport à la concentration des nitrates.À l'exception du Forage F4 qui présente une concentration 58,25 mg/l toutes les teneurs sont inférieures à la valeur guide de l'OMS.

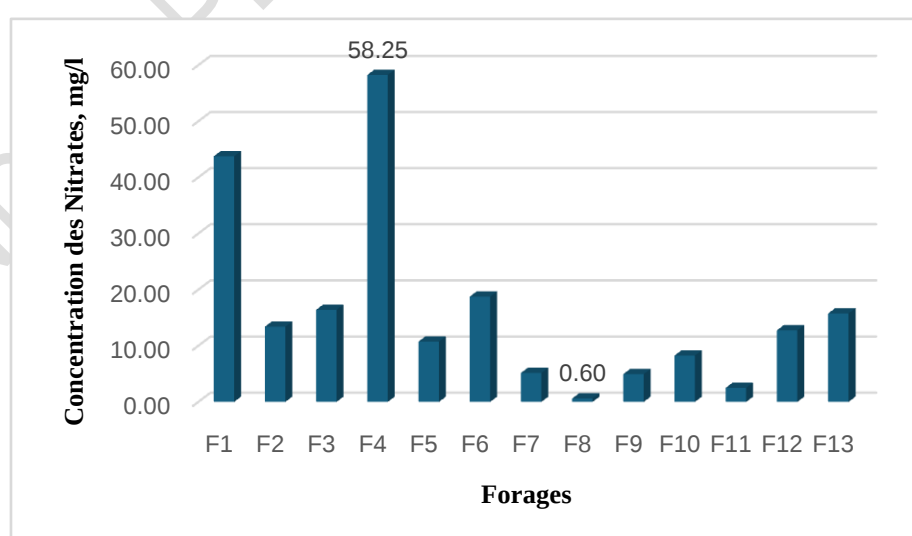


Figure 8 : Concentration des Nitrates dans les eaux de forages à Lambanyi

Calcium

Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables et sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Les teneurs en calcium des eaux des échantillons analysés dans cette zone varient entre 0,93 mg/L au forage F9 à 33,16 à celui F4 mg/L. La valeur moyenne de la concentration en calcium est 14,66 mg/L. Tous les points d'eau étudiés ont des concentrations nettement inférieures à la valeur maximale admissible de l'OMS qui est de 200 mg/L.

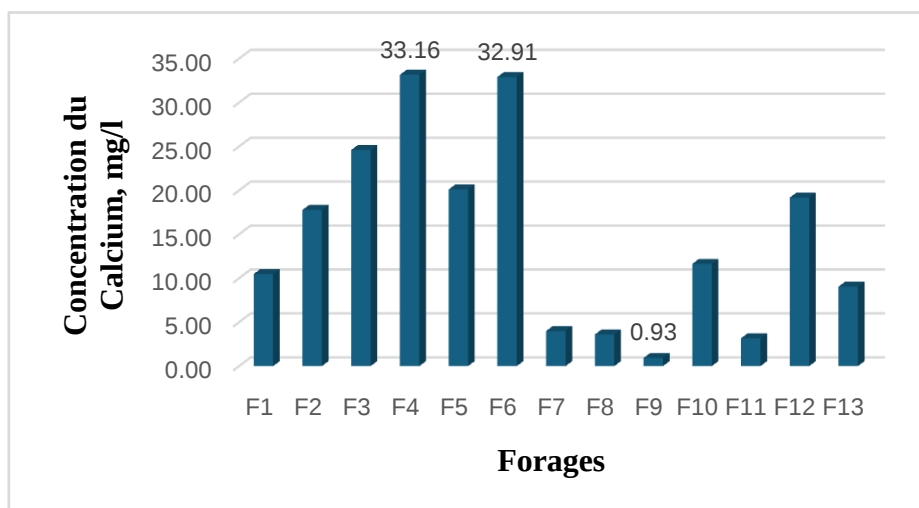


Figure 9 : Concentration du Calcium dans les eaux des forages de Lambanyi

Chlorures

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et de potassium (KCl)(Mabonzo, 2020). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution. Les chlorures existent dans toutes les eaux à des concentrations très variables. L'origine peut être naturelle. Les teneurs en chlorures des échantillons d'eau analysés affichent des valeurs qui varient entre 2,20mg/L et 38,65 mg/L. La valeur la plus élevée est celle du forage F6 soit 38,65 mg/L. Les points d'eau étudiés sont conformes aux normes, étant donné que la concentration en chlorures est très inférieure à celle recommandée pour les eaux potables établies par l'OMS et qui est de l'ordre de 250 mg/L.

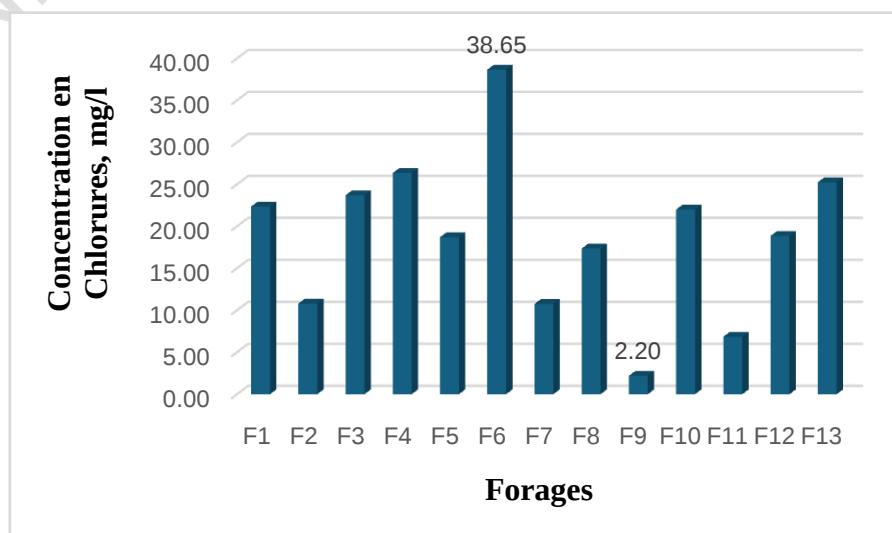


Figure 10 : Concentration en Chlorures dans les eaux des forages de Lambanyi

Potassium

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium. L'ensemble des eaux échantillonnées de la zone présentent des valeurs de concentration du potassium variant entre 0,49 mg/l et 14,71 mg/l. tous ces teneurs sont inférieures à la valeur guide établie par l'OMS. Par conséquent ces eaux ne présentent pas de danger majeur du point de vue teneur en Potassium.

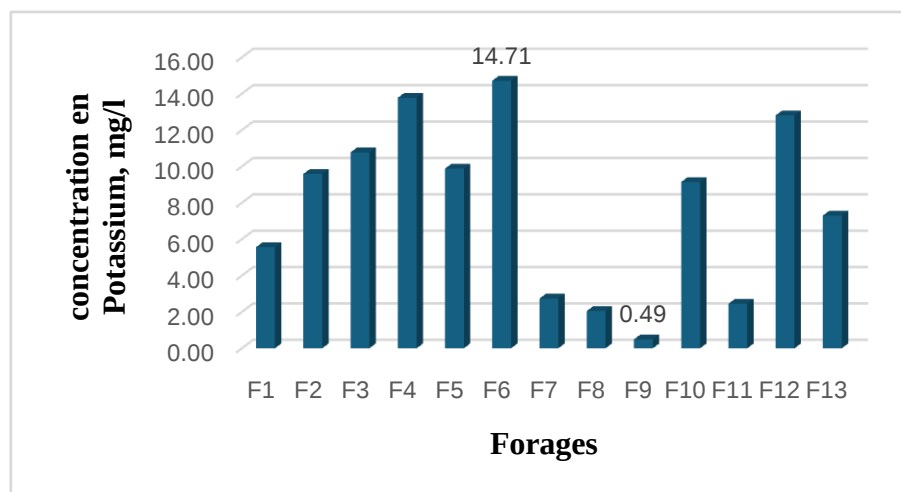


Figure 11 : variation de la concentration en Potassium dans les eaux des forages

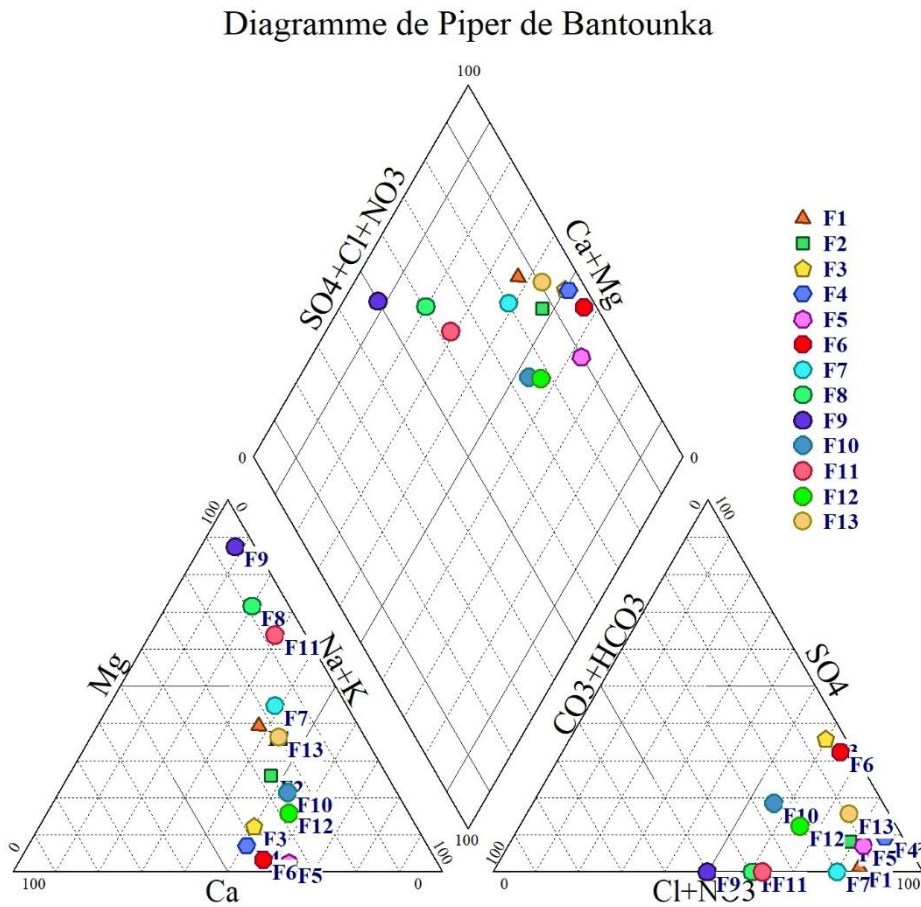
Diagramme Piper

L'analyse des résultats chimiques des ions majeurs par la méthode hydrochimique qui utilise le diagramme triangulaire de Piper montre que les eaux souterraines présentent différentes classes. La **Figure 10**, présente les faciès hydrogéochimiques des eaux des treize forages échantillonnés dans les quartiers Nassouroulaye et Bantounka sur le diagramme de Piper. Le diagramme de Piper est un diagramme indispensable pour la détermination des classes hydrogéochimiques des eaux souterraines (Kabour et *al.*, 2017). Il montre la concentration relative des différents ions (cations et anions) à partir des échantillons d'eau individuels.

L'analyse du diagramme Piper montre que les eaux des forages de la zone d'études présentent deux faciès majeurs à savoir :

- Les eaux Chlorurées et Sulfatée, calcique et magnésienne (69,23%) ;
- Les eaux Chlorurées sodique et potassique ou sulfatées sodiques (30,76%).

230 Les eaux Chlorurées et Sulfatée, calcique et magnésiennes sont représentées par les forages F1,
 231 F2, F3, F4, F7, F8, F9, F11 et F13 tandis que les eaux Chlorurées sodique et potassique ou
 232 sulfatées sodiques sont constituées par les forages F5, F6, F10 et F12.



233 **Figure 12 :** Diagramme Piper des eaux des forages de la zone d'études

Corrélations entre les paramètres

	pH	T°	CE	Couleur	Turbidité	Dureté	Cl-	NO2	NO3	SO4	F	Ca	Fe	Mg	Na	K
pH	1,00															
T°	-0,34	1,00														
CE	-0,17	-0,38	1,00													
Couleur	-0,09	0,14	-0,35	1,00												
Turbidité	-0,07	0,18	-0,29	0,97	1,00											
Dureté	0,22	-0,02	-0,09	-0,32	-0,27	1,00										
Cl-	-0,19	-0,25	0,80	-0,16	-0,14	-0,15	1,00									
NO2	0,21	-0,49	0,17	-0,11	-0,09	0,04	0,01	1,00								
NO3	-0,34	-0,09	0,71	-0,23	-0,18	-0,16	0,49	-0,05	1,00							
SO4	-0,38	0,03	0,62	-0,24	-0,23	-0,07	0,78	-0,04	0,19	1,00						
F	-0,27	0,12	0,38	-0,28	-0,21	-0,30	0,02	-0,18	0,30	0,36	1,00					
Ca	-0,43	-0,15	0,72	0,08	0,09	0,04	0,77	0,19	0,58	0,62	-0,03	1,00				
Fe	0,14	0,44	-0,45	0,16	0,13	-0,13	-0,55	0,02	-0,18	-0,33	0,13	-0,35	1,00			
Mg	0,43	0,07	-0,50	-0,31	-0,27	0,80	-0,58	-0,08	-0,48	-0,43	-0,23	-0,56	0,10	1,00		
Na	-0,41	-0,24	0,64	0,16	0,20	0,11	0,68	0,31	0,35	0,64	-0,01	0,92	-0,49	-0,46	1,00	
K	-0,40	-0,25	0,67	0,18	0,21	0,05	0,67	0,36	0,44	0,58	-0,02	0,94	-0,43	-0,52	0,99	1,00

a. Corrélations très fortes positives

Corrélation Conductivité électrique, Chlorures, Nitrates et Calcium :

La corrélation CE et Cl⁻ : $R^2 = 0,64$, est la plus forte des trois relations. Elle indique la conductivité est fortement influencée par la concentration en Chlorures, principaux ions responsables de la minéralisation. Cette corrélation suggère une origine anthropique probable, liée aux infiltrations des eaux usées domestiques ou la dissolution des sel minéraux.

Corrélation CE-NO₃ : $R^2 = 0,514$ est une corrélation modérée à forte. Elle montre que les nitrates contribuent également à l'augmentation de la conductivité mais de manière moins marquée que les chlorures. Cette tendance révèle une pollution azotée d'origine domestique (rejets d'eaux usées, latrines, ...).

Corrélation CE-Ca : $R^2 = 0,509$, corrélation modérée. Cela traduit l'influence du calcium sur la conductivité, souvent liée à la dissolution des carbonates ou les silicates des aquifères. Cette corrélation reflète davantage la minéralisation naturelle de l'eau que la pollution anthropique.

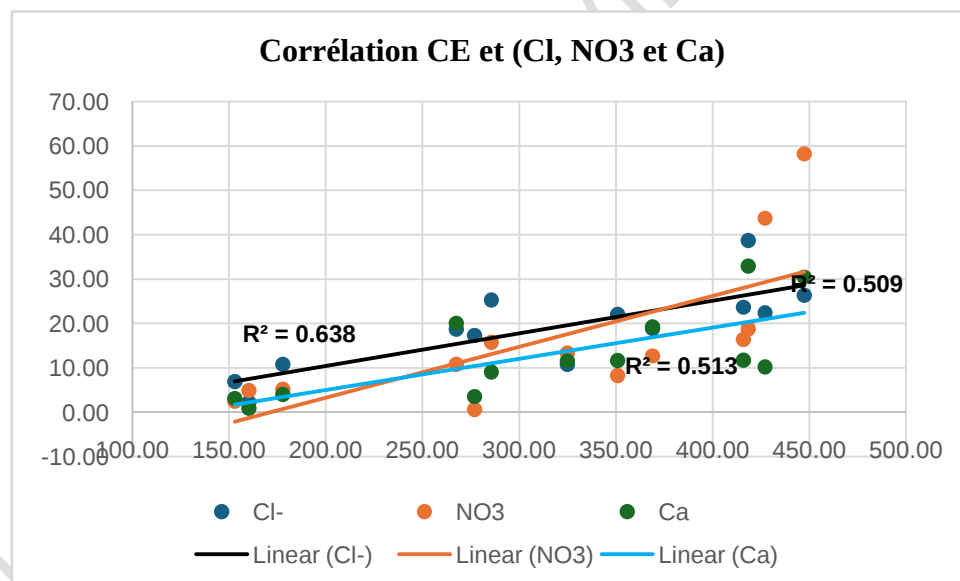


Figure 13 : Corrélation forte entre la CE et les paramètres Chlorures, Nitrates et Calcium

Corrélation Couleur et turbidité : $R^2 = 0,93$ indique 93 % de la variation de la turbidité est expliquée par la variation de la couleur de l'eau. Autrement dit lorsque la couleur augmente la turbidité augmente presque de manière proportionnelle. ce lien linéaire traduit une relation directe et très significative entre ces deux indicateurs de qualité visuelle de l'eau. Cela signifie que les sources de coloration et de turbidité sont communes, traduisant un même processus de pollution ou de minéralisation. Ainsi, la turbidité peut être utilisée comme indicateur fiable de la charge particulaire et organique qui influence également la couleur de l'eau.

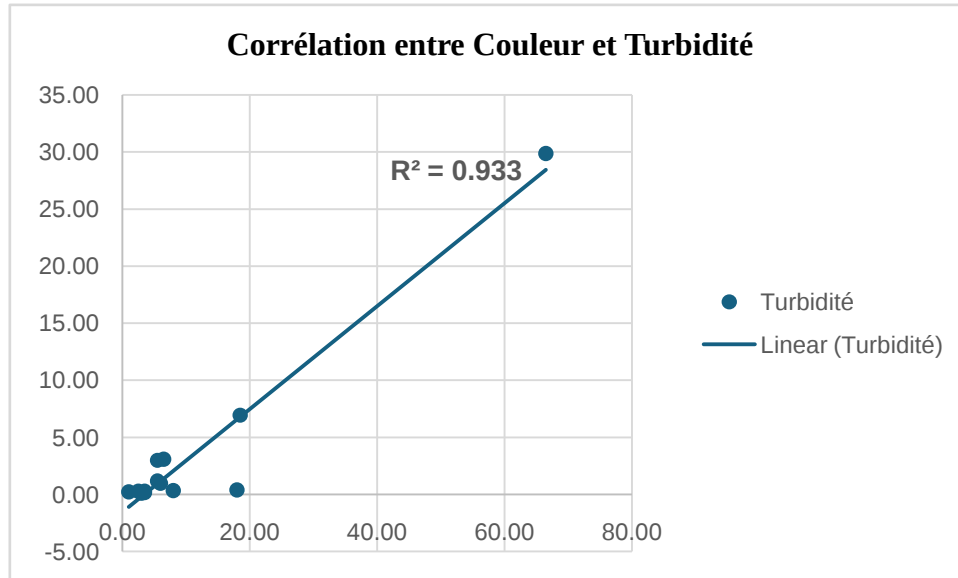
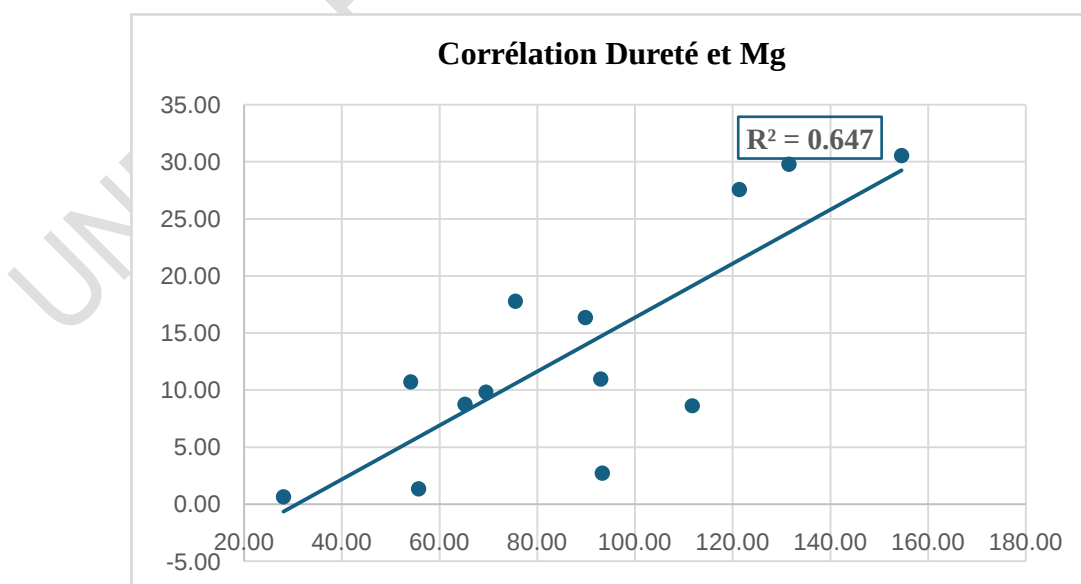


Figure 14 : Corrélation entre Couleur et Turbidité

Corrélation entre Dureté et Magnésium : la valeur de $R^2 = 0,647$ signifie que 64,7% de la dureté peut être expliquée par la variation du Magnésium. La tendance linéaire ascendante montre que lorsque la concentration en magnésium augmente, la dureté de l'eau augmente également. Cette relation est significative mais elle n'est pas parfaite, ce qui suggère que d'autres ions comme calcium contribuent aussi à la dureté totale. L'augmentation du magnésium reflète la dissolution des minéraux magnésien tels que les dolomites, les marnes ou certains silicates. Le lien observé traduit donc une origine géologique de la dureté, liée à la nature des formations aquifères traversées.

Les eaux échantillonnées proviennent probablement des roches carbonatées et magnésiennes. Elle indique aussi un équilibre naturel entre le calcium et magnésium, typique des aquifères carbonatés ou silicatés altérés. La dureté, dans ce cas, n'est pas nécessairement un signe de



pollution mais plutôt un indicateur de minéralisation naturelle.

Figure 15 : corrélation entre Dureté et Magnésium

Corrélation entre les chlorures et les sulfates : $R^2 = 0,6025$ indique que 60,25% de la variation des sulfates peut être expliquée par celle des chlorures. La droite de régression ascendante traduit une relation linéaire positive. Cette tendance suggère une évolution conjointe des deux ions, résultant probablement d'une même origine ou d'un même processus géochimique. Les ions Chlorures et Sulfates sont des ions majeurs qui participent à la minéralisation de l'eau. La corrélation entre les deux indique qu'ils proviennent de sources communes ou simultanées. Ces sources peuvent être dû à la dissolution conjointe des minéraux évaporitiques ou des intrusion anthropiques (rejet ménagers ou lixiviation urbaine).

Cette relation indique une contamination par les eaux usées riches en chlorures et en sulfates. Du point de vue géologique, elle révèle un contrôle lithologique, c'est-à-dire une influence directe de la nature des roches sur la composition chimique des eaux.

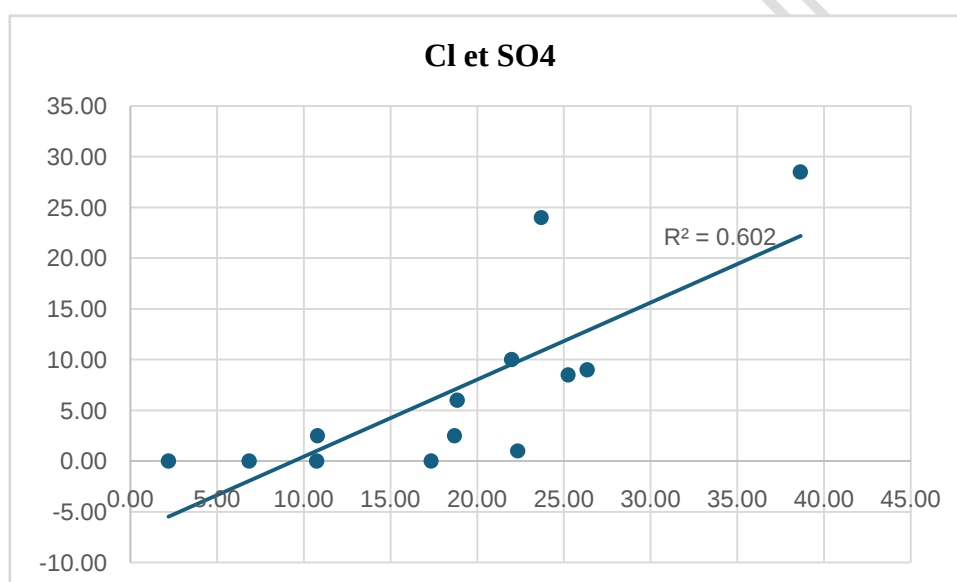


Figure 16 : corrélation entre les chlorures et les sulfates

Corrélation entre le Calcium, Sodium et Potassium : $R^2 = 0,8408$ (Ca et Na) soit 84,08% de la variation du Sodium expliquée par celle du Calcium. $R^2 = 0,8885$ (Ca et K), cette corrélation indique que 88,85% de la variation du potassium est expliquée par celle du calcium. Ces valeurs montrent une relation linéaire très forte entre le calcium et ces deux cations. Les corrélations fortes entre le Calcium, Sodium et le potassium traduisent un processus de minéralisation commun. Ainsi, ces éléments proviennent généralement de la dissolution de minéraux dans les roches aquifères. Leur évolution parallèle suggère une même source géologique ou des interactions eau-roches similaires. Les eaux de la zone d'étude sont probablement issues d'un aquifère à matrice silicatée ou carbonatée. Elles peuvent être dû au lessivage des minéraux libéré simultanément des cations.

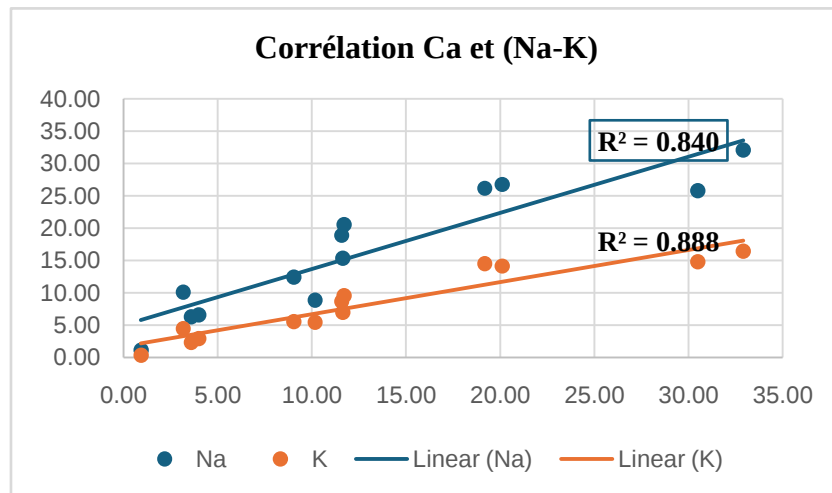


Figure 17 : corrélation entre le Calcium, le Sodium et le Potassium

Corrélation entre Sodium et Potassium : $R^2 = 0.9773$ indique la variation du potassium peut être expliquée à 97,73% par celle de sodium. Une telle corrélation traduit une évolution parallèle et fortement proportionnelle entre ces deux cations. La forte corrélation entre ces deux paramètres résulte d'un même processus d'échange cationique entre l'eau et les minéraux argileux. Ce processus traduit une même origine géologique et un comportement hydrogéochimique couplé dans la solution aqueuse. D'une part cette corrélation résulte d'une minéralisation naturelle de l'aquifère. D'autre part, elle peut être anthropique, par des rejets domestiques contenant à la fois du sodium et du potassium. Dans les deux cas cette corrélation forte montre que les deux éléments partagent une même dynamique de transfert et d'enrichissement de l'eau.

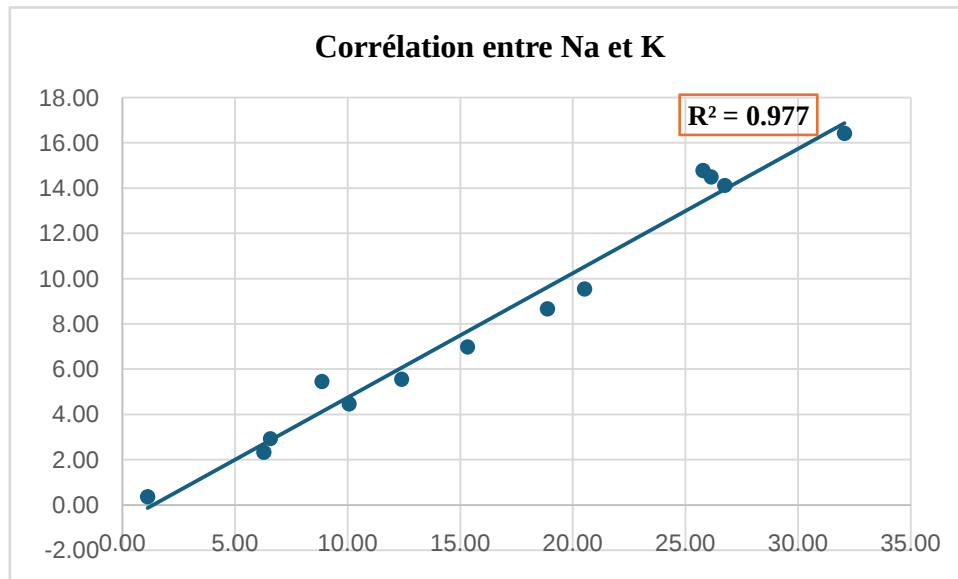
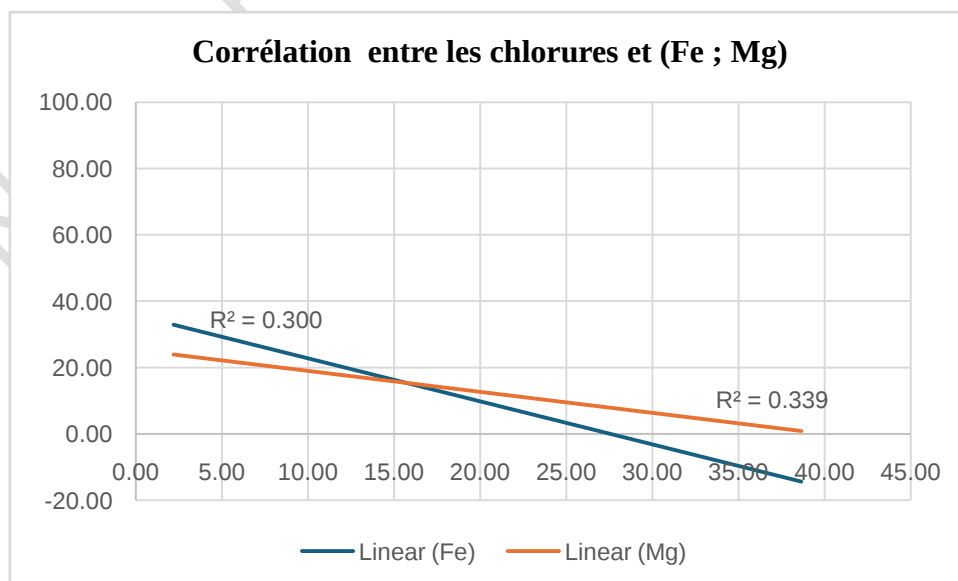


Figure 18 : corrélation entre le sodium et le potassium.

b. Corrélations négatives

- Entre les chlorures et le fer ($r=-0,55$) puis le chlorure et le magnésium ($-0,58$). $R^2 = 0,3004$ (Fe) et $R^2 = 0,3395$ (Mg) indique que 30 à 34 % de la variation du fer et du magnésium peut être expliquée par la variation des chlorures. Ces tendances indiquent que le fer est inversement lié aux sels dissous. Cela peut indiquer que dans les eaux plus minéralisées, le fer précipite en oxyde ou hydroxyde et reste moins en solution. Quant au magnésium, il provient principalement de la dissolution de roches silicatées. Sa faible corrélation négative avec les chlorures suggère une origine géologique différente ou une mobilisation limitée par rapport à la salinité croissante.



- Aussi le magnésium et le sodium ($r=-0,45$) puis le magnésium et le potassium ($r=-0,52$). Cette corrélation fait une suggestion d'un antagonisme dans les processus géochimiques. Lorsque les échanges ioniques enrichissent en sodium et potassium le magnésium tend à diminuer.

Le magnésium est souvent associé à la dissolution des silicates magnésiennes. Tandis que le sodium et le potassium proviennent de la dissolution des feldspaths, mica ou évaporites. L'absence de corrélation positive montre que ces ions sont libérés par les mêmes processus géochimiques.

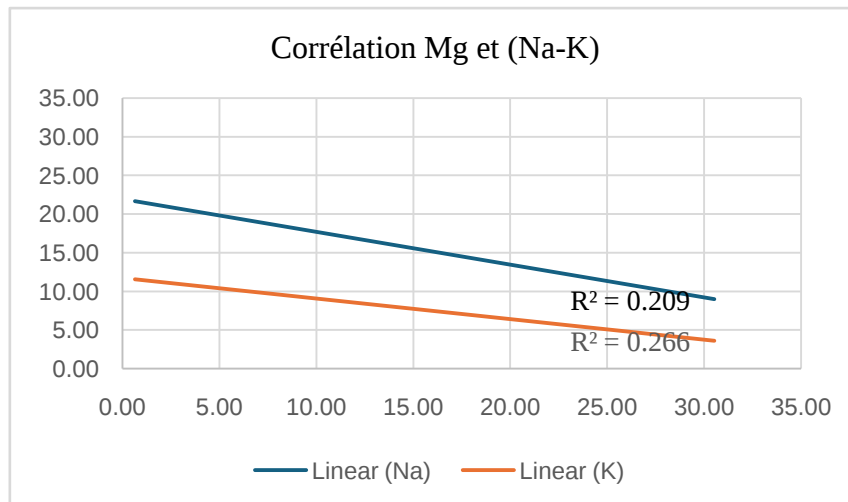


Figure 19 : corrélation entre Magnésium Sodium et Potassium

La minéralisation de l'eau est dominée par les chlorures, le calcium, le sodium et le potassium. Ces paramètres sont fortement corrélés entre eux et sont responsables de la conductivité électrique. La dureté est surtout liée au magnésium, ce qui reflète la géologie de la zone avec dissolution des roches magnésiennes. Les nitrates qui sont polluants anthropiques sont associés à la conductivité et au calcium ce qui peut refléter des apports de sources diffuses (latrines). Les paramètres esthétiques (couleur et turbidité) évoluent ensemble et indiquent probablement la présence des matières organiques et des particules.

Analyse des Composantes Principales (ACP)

Le graphique de la figure... est utilisé pour faire l'analyse en Composantes Principales. Ce graphique est un résumé visuel qui montre les relations entre les variables et les individus. Pour interpréter ce biplot, on se concentre sur plusieurs aspects : la longueur des flèches, l'angle entre les flèches et la direction des flèches. La longueur des flèches est proportionnelle à la contribution de la variable à la formation du plan. Les flèches les plus longues indiquent que ces variables sont bien représentées. Un angle aigu (proche à 0°) signifie une corrélation positive, angle droit (proche à 90°) signifie qu'il n'y a pas de corrélation (variables orthogonales) et un angle obtus (proche de 180°) signifie une corrélation négative.

Tableau 1 : Analyse en composantes principales

Numérocomposante	Valeurpropre	Pourcentage de variance	Pourcentagecumulé
1	5,99441	37,465	37,465
2	2,74193	17,137	54,602
3	2,23227	13,952	68,554
4	1,51236	9,452	78,006
5	1,02586	6,412	84,418
6	0,858665	5,367	89,784
7	0,666314	4,164	93,949
8	0,616275	3,852	97,801
9	0,237129	1,482	99,283
10	0,0532929	0,333	99,616
11	0,0482389	0,301	99,917
12	0,0132549	0,083	100,000
13	8,07602E-16	0,000	100,000
14	6,79058E-17	0,000	100,000
15	-7,65749E-17	0,000	100,000
16	-6,16191E-16	0,000	100,000

En combinant l'analyse des quatre composantes, on peut identifier des groupes de forages qui se comportent de manières similaires.

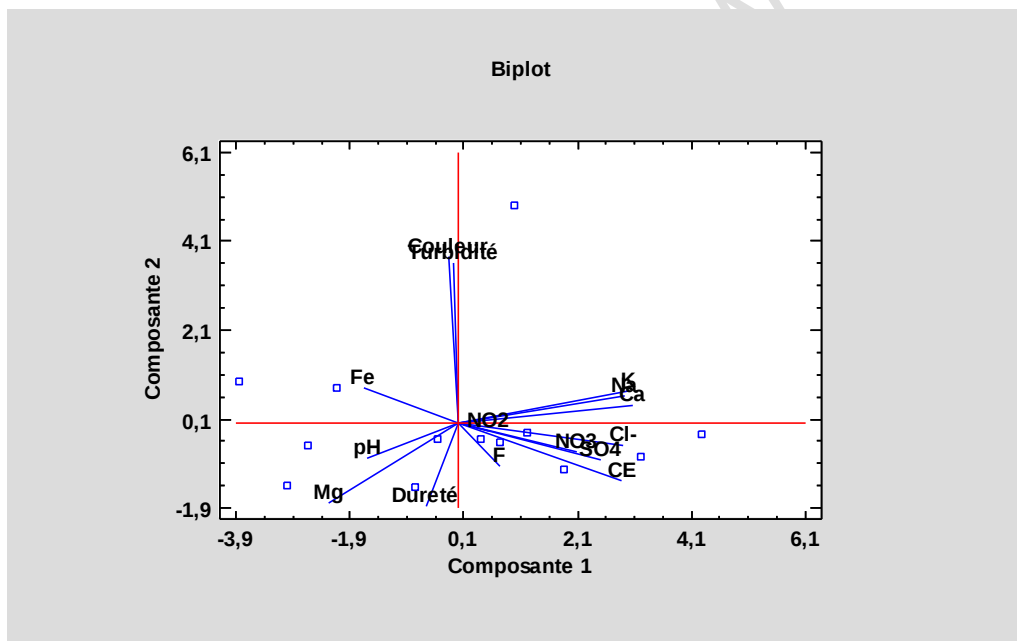
- Les forages F3, F4 et F6 forment le groupe 1. Ils ont des scores élevés sur la composante 1 et des scores négatifs sur la composante 2. F3 est également négatif sur la composante 3.
- Ceux F8, F9 et F11 forment le groupe 2. Ces forages sont négatifs sur la composante 1. F8 et F9 sont également négatifs sur la composante 2, tandis que F8 est positif sur la composante 3.
- Les forages F5 et F12 sont atypiques. Le forage F5 a un score exceptionnellement élevé sur la composante 2. Celui F12 a des scores positifs sur la composante 3 et surtout la composante 4, ce qui les distingue clairement des autres.

Ce tableau révèle que les forages ne sont pas uniformes. Ils se regroupent en fonction de caractéristiques sous-jacentes (les composantes) qui les différencient les uns des autres.

L'axe de la composante 1 est positivement corrélé avec les variables Na, K, NO₃, Cl-SO₄ et négativement corrélé avec le Mg, la Dureté, pH, Fe. Il pourrait représenter une dimension liée à la minéralisation ou à la salinité de l'eau car des ions comme Na, K-SO₄ et la conductivité électrique y sont fortement associés.

Celui de la composante 2, fortement corrélé positivement avec la Couleur et la turbidité, et elle ne corrèle négativement avec aucune variable de manière significative. Il pourrait représenter une dimension liée à la clarté ou la pureté physique de l'eau.

Le groupe de variables (Na, K, Cl-So₄, CE) qui sont fortement corrélées entre elles et qui définissent l'axe horizontal, possiblement lié à la salinité. L'autre groupe (Couleur, Turbidité) est fortement corrélé et définit par l'axe vertical, lié à la turbidité de l'eau. Des variables comme Mg et Dureté sont corrélées négativement avec celles du groupe de la salinité, ce qui



pourrait indiquer une origine différente de la minéralisation.

Figure 20 : composantes principales

Analyse biochimique

Les résultats des analyse microbiologiques ont montrés que les eaux des forages échantillonnés sont contaminées par les germes fécaux (E. coli). La figure 21 montre, sur les trois échantillons analysés, deux présentent contamination fécale dans les 100 ml analysée. L'échantillon F4 présente un colis dans les 100ml d'eau analysée. Celui F11 présente 37 colis dans les 100 ml d'eau analysée. Tandis que l'échantillon prélevé au F10 ne présente aucune contamination fécale. Le forage F10 présente une eau potable, elle ne présente aucun risque pour la santé humaine, celui F4 ressort une contamination faible et le F11 présente une classe moyenne avec un risque sanitaire pour sa consommation.

Cette contamination peut être due aux facteurs suivants :

- A l'âge du forage ;
- A la fréquentation ;
- A la distance non conventionnelle entre le forage et les fausses septiques.

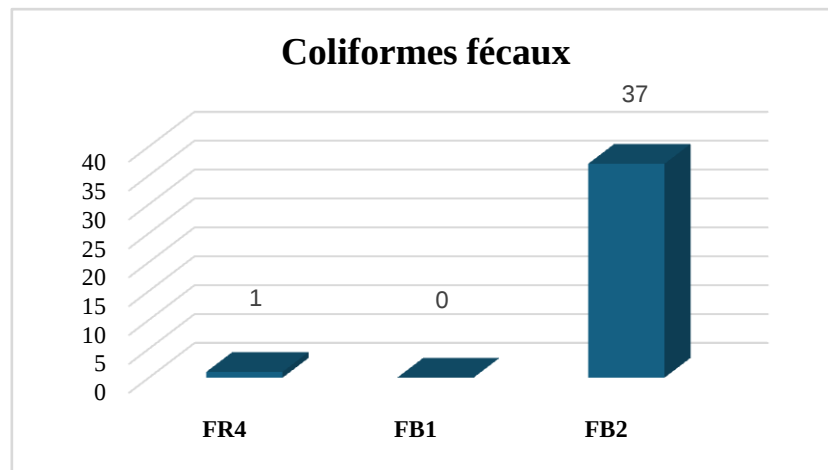


Figure 21 : Les coliformes fécaux dans les échantillons d'eau

Discussion

Les paramètres physico-chimiques des différents forages d'eau domestique sont discutés en relation avec les directives de l'OMS. L'importance de la concentration en ions hydrogène (pH) de l'eau est évidente dans la manière dont elle affecte les réactions chimiques et les activités biologiques qui ne se produisent que dans une plage étroite (Adesakin et *al.*, 2020). Dans la présente étude, les concentrations du pH observée dans l'eau de forages est majoritairement acide et la plage de pH se situant dans la plage standard acceptable se localise dans les forages F1, F9 et F12 comme indiqué dans la directive pour les eaux potables de 6,5 à 8,5(OMS, 2017). Cette affirmation est conforme à celle avancée par (Adesakin et *al.*, 2020) qui ont signifié la même plage correspondante aux eaux étudiées dans la communauté de Samaru, Zaria, nord-ouest du Nigeria. Les eaux des forages F2, F7, et F11 sont légèrement acide avec une moyenne de 6,39.

Dans la zone d'études la température des eaux souterraines varie entre 25.2 et 28.9°C avec une moyenne de 27.04°C. Cette température correspond aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes. Elle s'inscrit dans l'intervalle des valeurs définies (Mabonzo, 2020).

Conformément aux normes édictées par l'OMS cités plus haut, 76,92% des eaux des forages sont acides avec des valeurs qui varient entre 5,75 à 6,37. Seul les forages F1 et F12 présentent une eau jugée normale comme elle se trouve dans les normes prescrites par l'OMS. Le forage F8 avec une valeur de 9,33 présente une eau basique car elle dépasse le seuil (8,50) prescrit par l'OMS. Ces résultats sont confirmés ceux (Kouassi et *al.*, 2012; Salifou et *al.*, 2015; Yasmine & Rym, 2021). Les résultats des analyse chimiques ont été confirmé par ceux de (Kengni et *al.*, 2012; Salifou et *al.*, 2015; Saby, 2015; Mehounou et *al.*, 2016; Yasmine et

Rym, 2021; Diawara et *al.*, 2024; Mouakoumbat et *al.*, 2025). Les analyses microbiologiques ont été confirmées par (Mehounou et *al.*, 2016; Taliby, 2017).

Conclusion

L'étude portant sur l'analyse de la qualité physico chimique et microbiologique des eaux de forages dans les quartiers Bantounka et Nassouroulaye de la commune de Lambanyi a permis de mettre en évidence des caractéristiques essentielles du fonctionnement hydrochimique de ces ressources ainsi que les risques potentiels liés à leur utilisation pour la consommation humaine.

Sur le plan physico chimique, les résultats montrent que la majorité des eaux analysées présentent une acidité marquée, avec près de 77% des échantillons ayant un pH inférieur aux normes recommandées par l'OMS. Cette acidité peut être attribuée à la nature géologique des aquifères ainsi qu'à l'interaction eau-roche. En revanche, les valeurs de la conductivité électrique, globalement inférieure à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquent une minéralisation modérée des eaux, conforme aux standards de potabilité.

L'analyse des ions majeurs révèle que les concentrations en sulfates, chlorures, calcium et potassium restent largement inférieures aux limites admissibles, traduisant une qualité chimique globalement acceptable. Toutefois, la présence ponctuelle de teneurs élevées en nitrates, notamment au niveau du forage F4, suggère une influence anthropique, probablement liée aux infiltrations d'eaux usées domestiques.

Les analyses statistiques, notamment les corrélations et l'analyse en Composantes Principales (ACP), confirment ces observations en mettant en évidence une forte relation entre conductivité, chlorures, nitrates et calcium, relevant une contribution mixte entre minéralisation naturelle et pollution diffuse. Une association significative entre couleur et turbidité, indicatrice de matières en suspension et contamination d'origine organique, ainsi que des regroupements de forages traduisant une hétérogénéité spatiale de la qualité des eaux souterraines.

Sur le plan microbiologique, les résultats constituent un point critique majeur de l'étude. La présence de coliforme fécaux (*E. coli*) dans plusieurs échantillons indique une contamination d'origine fécale, rendant certaines eaux impropres à la consommation sans traitement préalable. Cette contamination est probablement liée à des facteurs tels que l'âge des forages, leur forte utilisation et le non-respect des distances sanitaires entre les forages et les fosses septiques.

Bien que les eaux de la zone d'étude présentent une qualité chimique globalement acceptable, leur qualité microbiologique reste préoccupante et l'acidité dominante constitue des limites importantes à leur potabilité. Ces résultats soulignent la nécessité de mettre en place des mesures de gestion durable, notamment le respect des normes d'implantation des ouvrages hydrauliques, le contrôle régulier de la qualité des eaux, la sensibilisation des populations et l'adoption de techniques de traitement adaptées au contexte local.

Références bibliographiques

- Adesakin, T. A., Oyewale, A. T., Bayero, U., Mohammed, A. N., Aduwo, I. A., Ahmed, P. Z., Abubakar, N. D., & Barje, I. B. (2020). Assessment of bacteriological quality and physico-chemical parameters of domestic water sources in Samaru community, Zaria, Northwest Nigeria. *Heliyon*, 6(8), e04773. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04773>
- Arif, R. D., & Meriouma, A. (2023). *Évaluation spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines dans la région de Ouargla* [Mémoire]. Université Kasdi Merbah-Ouargla.
- Diallo, Y. K. B., & Konaté, A. A. (2023). Hydrogeochemical characterization of the areas of exploitation of the CBG sites : Cas of the plateaus of N'Dangara and Boundou Wandé, Sangarédi sub-prefecture, Prefecture of Boké, Republic of Guinea. *Acta Scientifica Naturalis*, 10(2), 1-24. <https://doi.org/10.2478/asn-2023-0011>
- Diawara, B. L., Jr, G. D. S. Q., Li, Z., & Loua, J. J. (2024). Water Scarcity in Conakry, Guinea : Challenges and Proposed Strategies for a Way Forward. *Journal of Water Resource and Protection*, 16(04), 264-280. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2024.164015>
- Kabour, A., & Chebbah, Lynda. (2017). Caractérisation hydro-chimique et mise à jour de la salinité des eaux souterraines en région aride : Cas de l'aquifère du grès carbonifère de Kénadsa (Sud-Ouest Algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 41(1), 99-106.
- Kengni, L., Tematio, P., Filalirharrassi, K., Ngueke, J., Tsafack, E., Mboumi, T., & Mounier, S. (2012). Pollution des eaux superficielles et des nappes en milieu urbain : Cas de la zone industrielle de Douala-Bassa (Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(4), 1838-1853. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.39>
- Kouassi, M., Ahoussi, E., Koffi, B., Ake, Y., & Biemi, J. (2012). Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 504-518. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.45>

- Mabonzo, M. N. (2020). *Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la zone de contact du bassin sédimentaire côtier et du socle du Précambrien inférieur au sud-ouest de la République du Congo*. 10(21), 60-85.
- Mehounou, J. P., Josse, R. G., Dossou-Yovo, P., Senou, S. F., & Toklo, R. M. (2016). Caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines et superficielles dans la zone de production cotonnière d'Aplahoué. *Journal of Applied Biosciences*, 103, 9841-9853.
- Mimouni, Y. (2020). *Evaluations de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface de trois sous bassins de Tensift* [Mémoire].
- Mouakoumbat, N. J. L., Ebotehoua, C. G., & Mbilou, U. G. (2025). Suivi des Paramètres Physico-Chimiques des Eaux Souterraines du Bassin de l'Alima, affluent du Fleuve Congo : Campagnes de Grande Saison Sèche 2021 et 2022 dans les Districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji, République du Congo. *European Scientific Journal, ESJ*, 21(18), 96. <https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n18p96>
- OMS. (2017). *Directives de qualité pour l'eau de boisson* (OMS, Vols. 1-4).
- Saber, K. (2022). *Etude hydro-chimique et modélisation de la qualité des eaux souterraines (Cas de la Wilaya d'ILLIZI)* [Thèse]. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- Saby, M. (2015). *Caractérisation de la qualité naturelle des eaux souterraines de la zone Nicolet-Saint-François, Québec, Canada : Étude des temps de séjours et liens avec la géologie* [Mémoire Maitrise]. Université de Québec à Montréal.
- Salifou, I., Abdoukarim, A., Ibrahim, N., Mousa, B., Dominique, S., & Daouda, M. (2015). Caractéristique hydrogéochimique des eaux souterraines des aquifères de l'Izegouandé et du Tarat au voisinage de la Somaïr à Arlit au Niger. (Part. 57-63). *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 039.

- Taliby, C. (2017). *Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des sources d’approvisionnement en eau dans la ville de Conakry*. [Thèse]. UGANC.
- Thierrin, J., Steffen, P., Cornaz, S., Vuataz, F.-D., Balderer, W., & Looser, M. (2003). *Echantillonnage des eaux souterraines* (p. 84).
- Wang, H., Tassinary, L. G., & Newman, G. D. (2024). Developing the health effect assessment of landscape (HEAL) Tool : Assessing the health effects of community greenspace morphology design on non-communicable diseases. *Landscape and Urban Planning*, 244, 104990. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104990>
- Wang, Y., & al. (2019). *Groundwater Exploitation and Wetland Degradation in African Cities*.
- Wei, J., Li, Y., Lin, H., Lu, X., Zhou, C., & Li, Y. (2024). Copper-based electro-catalytic nitrate reduction to ammonia from water : Mechanism, preparation, and research directions. *Environmental Science and Ecotechnology*, 20, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100383>
- Yasmine, B., & Rym, B. (2021). *Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines brutes dans la wilaya de Constantine*. [Mémoire Master]. Université des Frères Mentouri Constantine 1.