



ISSN (O): 2320-5407
ISSN (P): 3107-4928

Journal Homepage: www.journalijar.com

INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH (IJAR)

Article DOI:10.21474/IJAR01/23812
DOI URL: <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/23812>



RESEARCH ARTICLE

EVALUATION DE LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE DES EAUX DES FORAGES DES QUARTIERS BANTOUNKA ET NASSOUROULAYE, COMMUNE DE LAMBANYI CONAKRY

Yaya Kenda Baïlo Diallo¹, Mory Kourouma², Aissatou Bobo Diallo³, Alpha Mamoudou Diallo¹, Mamadouba Sylla¹ and Alpha Oumar Bah⁴

1. Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké (ISMGB), Laboratoire Appliqué en Géoscience environnement.
2. Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké (ISMGB), Centre Emergent Mine et Société (CEMS).
3. Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG).
4. Université Gamal Abdel Nasser Conakry (UGANC).

Manuscript Info

Manuscript History

Received: 10 May 2026
Final Accepted: 12 June 2026
Published: July 2026

Key words:-

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

Abstract

This study focuses on the assessment of the physico-chemical and microbiological quality of drilling water in the neighborhoods of Nassouroulaye and Bantounka, located in the commune of Lambanyi, Conakry. In this urban context marked by a lack of drinking water supply infrastructure, populations rely heavily on groundwater for their domestic needs. The objective of this study is to characterize the water quality of the boreholes in this locality. The methodology adopted is based on the sampling of thirteen (13) boreholes drilled during two campaigns between September 2024 and June 2025. The physical parameters were measured in situ, while chemical analyses of major ions, microbiology and dissolved metals were carried out in the laboratory. The following statistical analyses were used to interpret the results obtained: Piper diagram, correlation analysis and Principal Component Analysis (PCA). The results show that the waters have a marked acidity of about 77% of the samples and the water temperature ranged from 25.2 to 28.9°C. Mineralization is moderate and complies with water potability standards. Major ion concentrations are generally low and respect the recommended thresholds. However, a high nitrate content (58.25 mg/L) was observed at drill hole F4. The hydrochemical analysis highlights two facies : calcium and magnesium chloride and sulphate waters (69.23%) and sodium and potassium chloride waters (30.76%). Statistical analyses reveal significant correlations between electrical conductivity, chlorides (0.80), nitrates (0.71) and calcium (0.72), reflecting a combined influence of natural processes and anthropogenic inputs the PCA highlights a spatial heterogeneity of water quality.

"© 2026 by the Author(s). Published by IJAR under CC BY 4.0. Unrestricted use allowed with credit to the author."

Corresponding Author:- Yaya Kenda Baïlo Diallo

Address:- Institut Supérieur des Mines et Géologie de Boké (ISMGB), Laboratoire Appliqué en Géoscience environnement.

From a microbiological perspective, the presence of fecal coliforms (*Escherichia coli*) up to 37 colonies in 100 ml of water in sample FB2 constitutes a major health risk. Although the water studied has an overall acceptable chemical quality, its microbiological contamination questions its potability for human consumption.

Introduction:-

L'eau constitue une ressource essentielle à la vie et au développement socio-économique des populations (Israilova et al., 2023). 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 (Mishra et al., 2021). Au Sénégal, 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 (Bouchemal, 2017 ; Carrard et al., 2019v; BELAIZA et LACHI, 2022). Selon Weston et al. (2024) 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.

Dans les travaux de Bouchemal (2017 ; Benkreif et al. (2023) ; Mohtar et al. (2024) il est indiqué que 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 (Aram et al., 2021 ; Singh et al., 2019).

Dans le contexte présent, l'hypothèse de la qualité des eaux souterraines exploitées par les forages domestiques des quartiers Bantouka et Nassouroulaye est le résultat de l'interaction entre les caractéristiques hydrogéologiques du milieu et les pressions anthropiques liées à l'urbanisation. Cette étude vise à analyser la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux des forages domestiques dans les quartiers Bantouka 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.

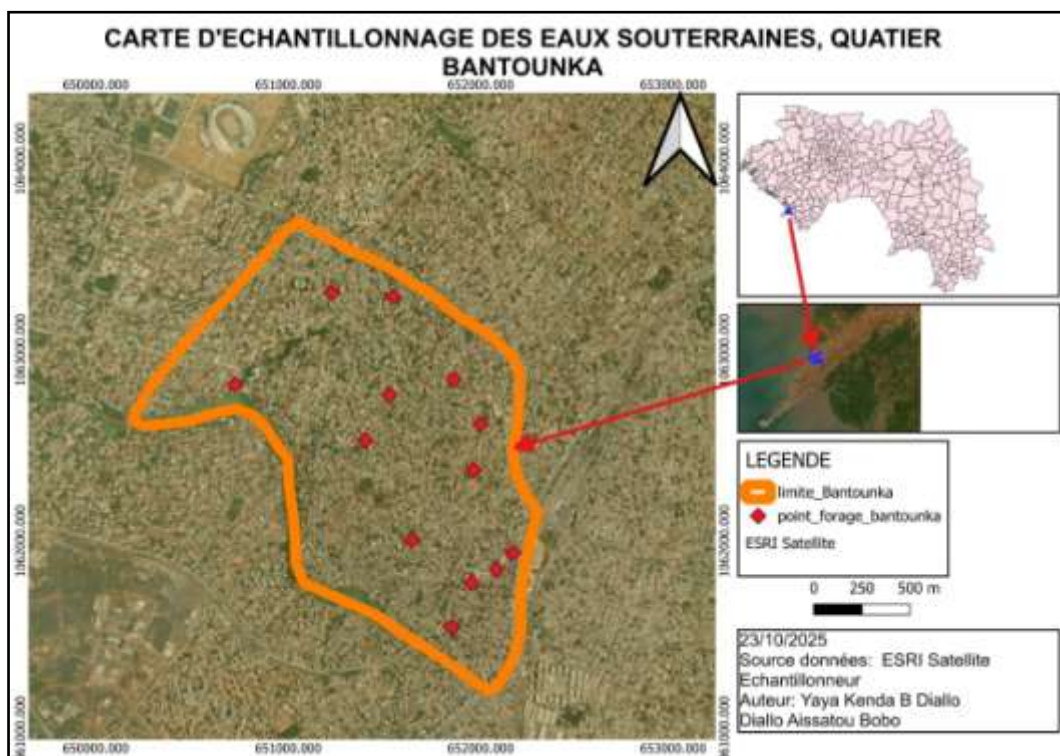


Figure 1 : Carte d'échantillonnages des eaux souterraines de la zone d'études

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 (Thierrin et 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, Avenza Maps, 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 Bantounga) 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 analysés par le spectrophotomètre DR 6000.



Figure 2 : Spectromètre DR 6000

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.

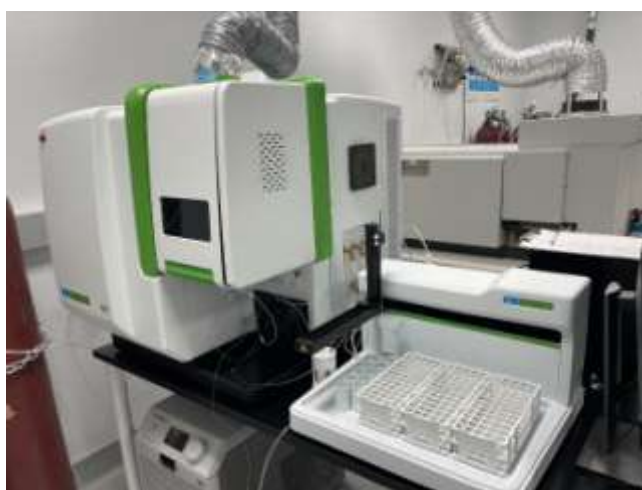


Figure 3 : Spectromètre d'émission optique ICP

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

Assurance et contrôle qualité:-

Les mesures suivantes ont été appliquées afin d'assurer la qualité des prélèvements : réalisation d'un échantillonnage représentatif de 13 forages répartis sur l'ensemble de la zone d'étude, au cours de deux campagnes (septembre 2024 et juin 2025), sélection des points de prélèvement après des enquêtes de terrain et un relevé GPS, utilisation de bouteilles en plastique de volume uniforme, nettoyage préalable des flacons à l'eau distillée, rinçage des flacons avec l'eau à prélever afin d'éviter toute contamination croisée et respect des étapes normalisées du prélèvement.

Contrôle de la qualité des données:-

La validation scientifique des résultats repose sur plusieurs approches complémentaires:-

- Comparaison des résultats analytiques avec les normes de l'OMS relatives à l'eau potable ;
- Utilisation du diagramme de Piper pour vérifier la cohérence hydrochimique et identifier les faciès des eaux ;
- Calcul des corrélations entre paramètres physicochimiques afin de détecter les relations significatives ;
- Réalisation d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) pour contrôler la cohérence des données, identifier les groupes de variables et mettre en évidence les facteurs expliquant la variabilité de la qualité des eaux.

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 recueillis 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.

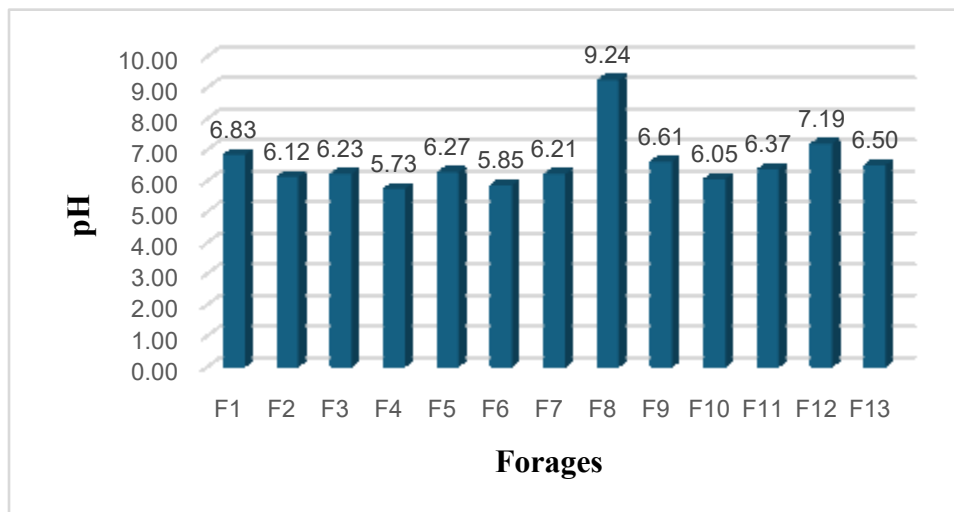


Figure 4 : Variation du pH dans les eaux de la zone d'études.

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.

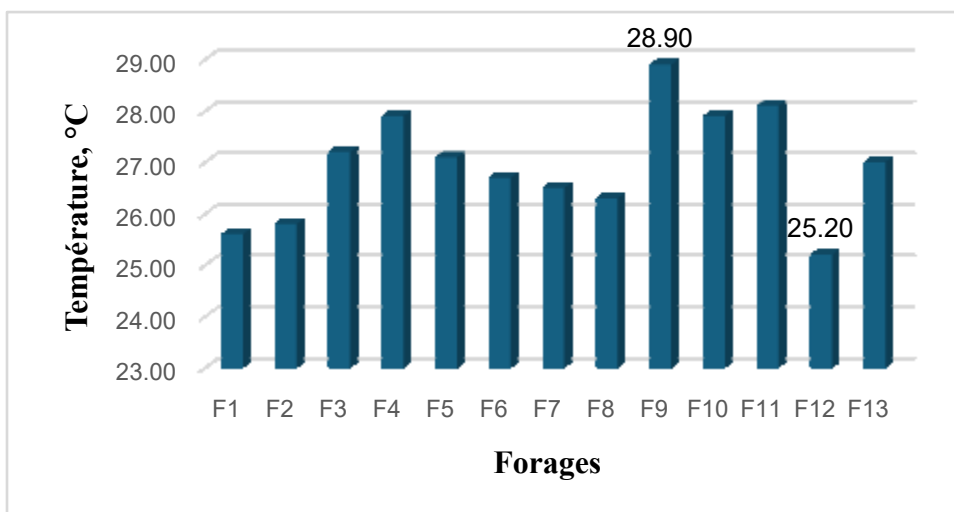


Figure 5 : Variation de la température des eaux souterraines de la zone d'études

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 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

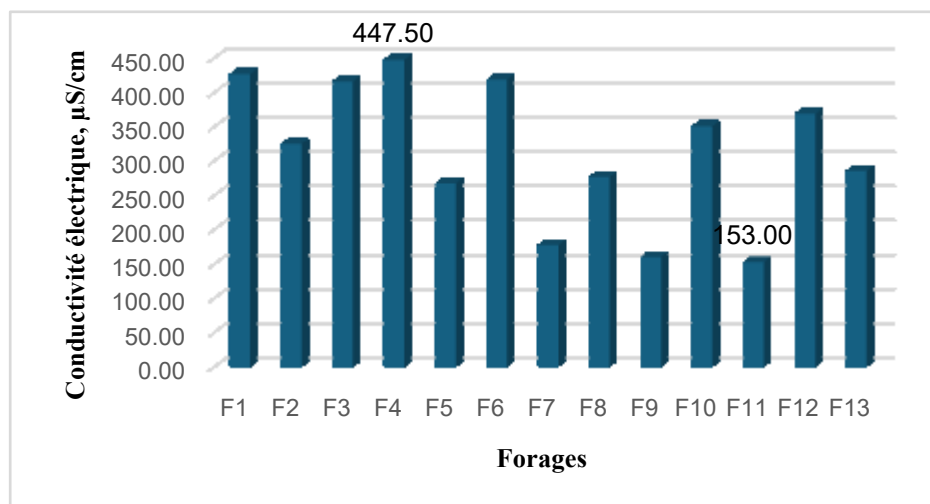


Figure 6 : variation de la conductivité électrique des eaux de la zone d'étude

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.

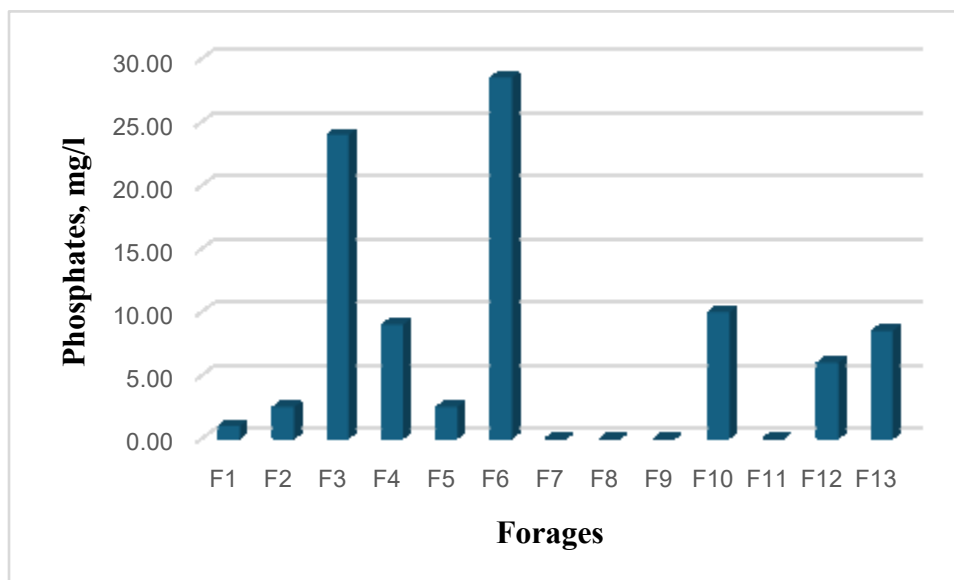


Figure 7 : valeurs de concentration des phosphates dans les eaux des forages de la zone d'études.

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. Wang et 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/L et 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.

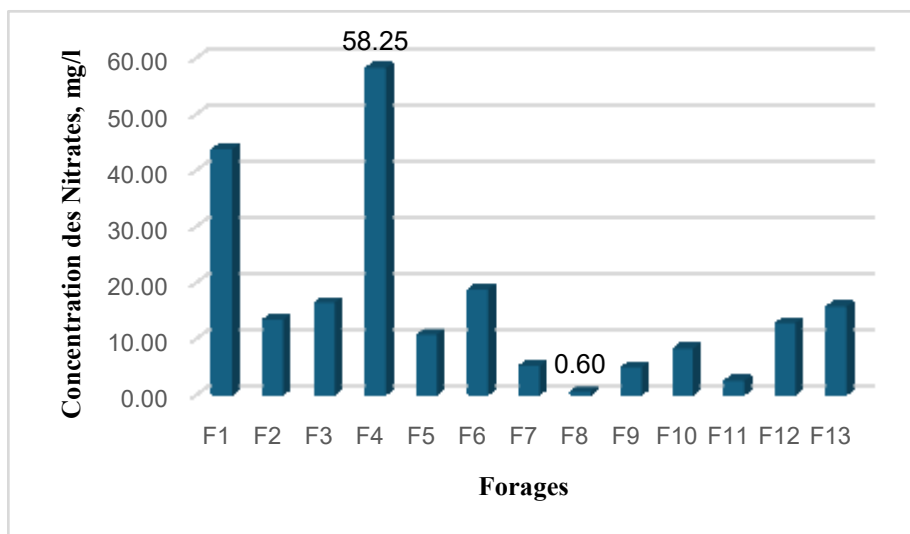


Figure 8 : Concentration des Nitrates dans les eaux de forages à Lambanyi

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 mg/L 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.

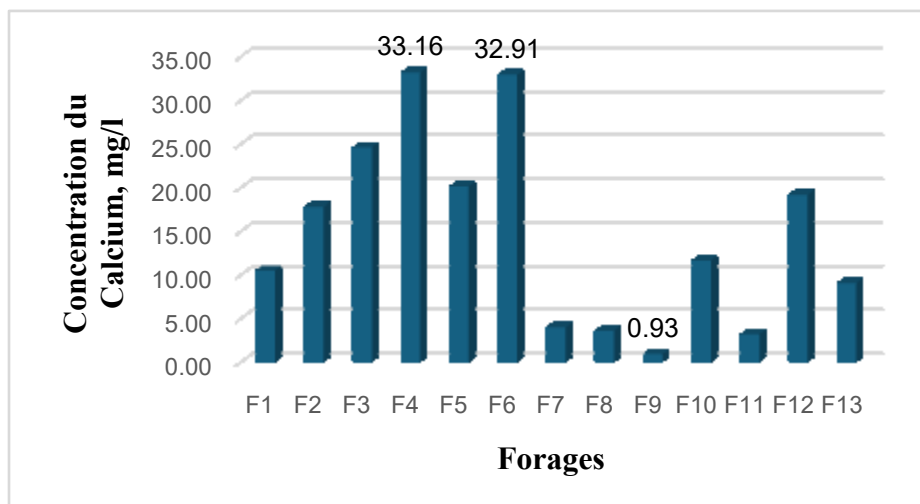


Figure 9 : Concentration du Calcium dans les eaux des forages de Lambanyi

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 2,20 mg/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 étudiées 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.

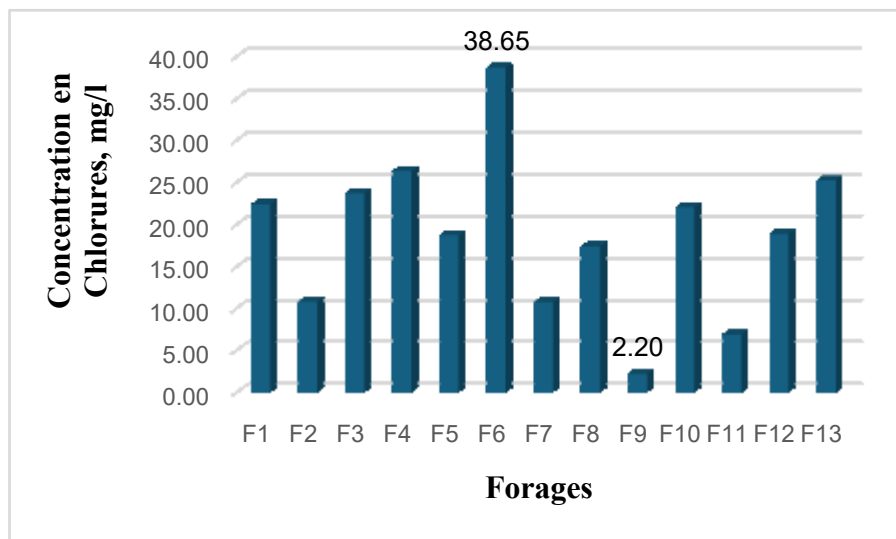


Figure 10 : Concentration en Chlorures dans les eaux des forages de Lambanyi

Potassium:-

Le potassium est généralement l'élément majeur le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium. L'ensembles 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.

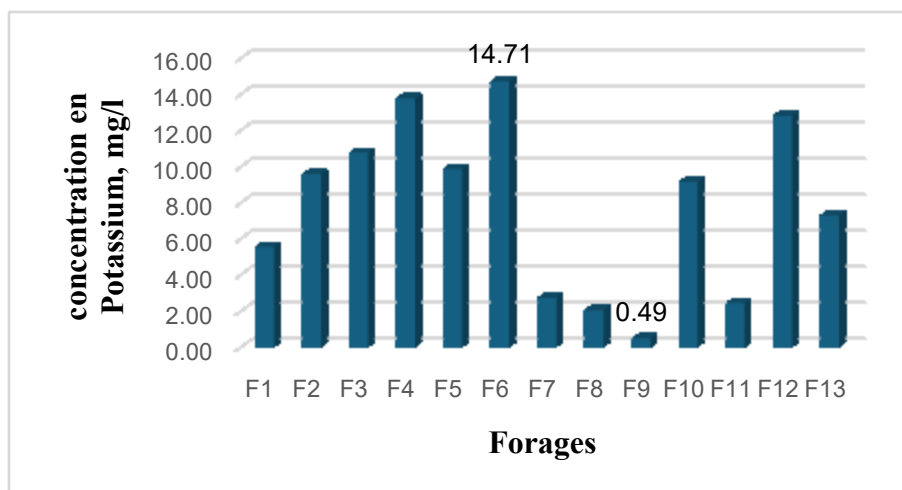


Figure 11 : variation de la concentration en Potassium dans les eaux des forages

Diagramme Piper:-

L'analyse des résultats chimiques des ions majeurs par la méthode hydrochimique qui utilise le digramme 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%).

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

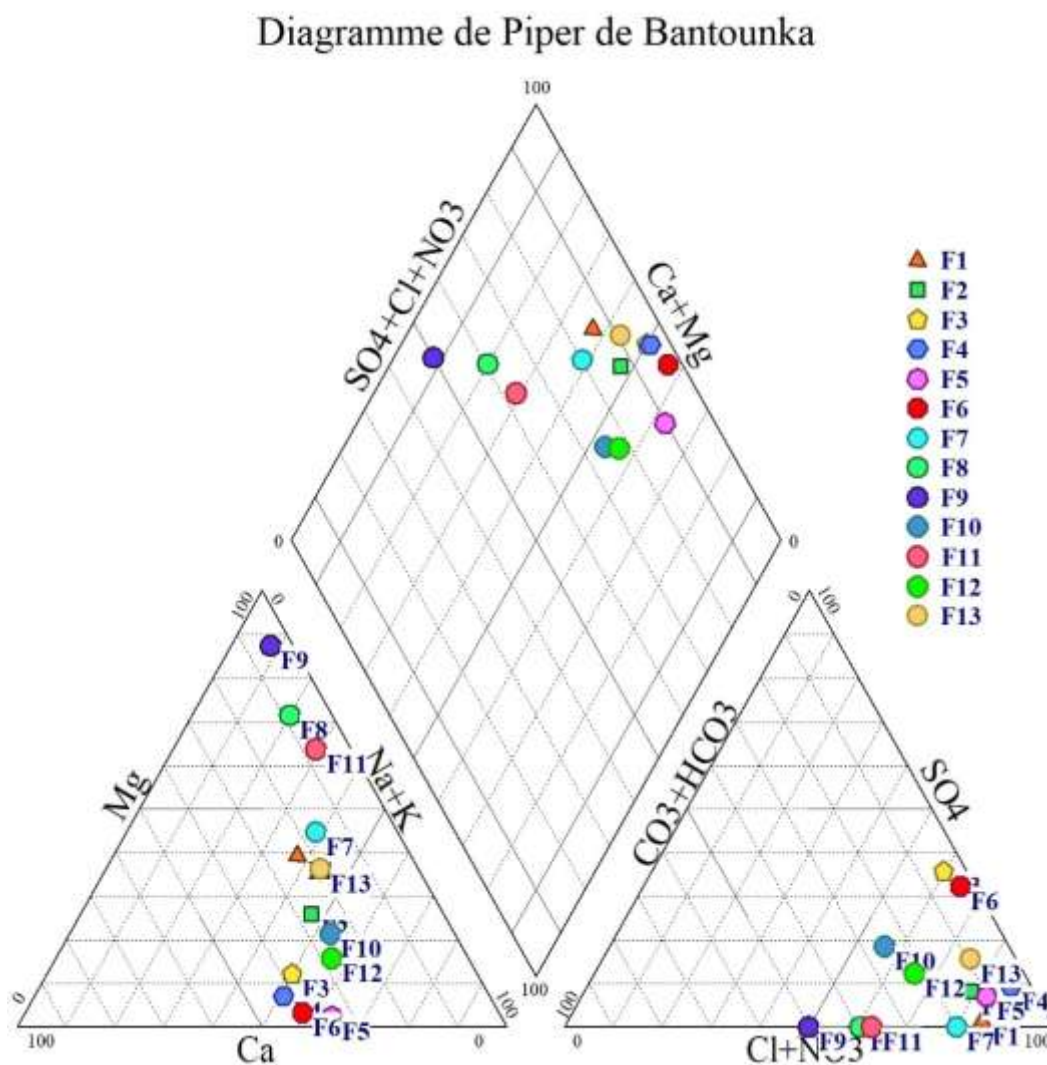


Figure 12 : Diagramme Piper des eaux des forages de la zone d'études

Corrélations entre les paramètres:-

	pH	T°	CE	Couleur	Turbidité	Dureté	Cl-	NO ₂	NO ₃	SO ₄	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

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.

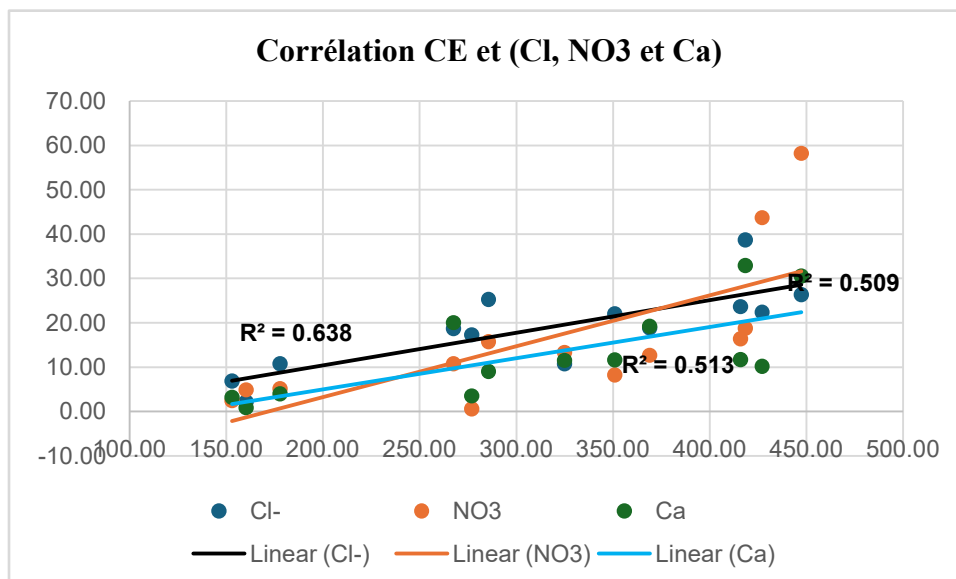


Figure 13 : Corrélation forte entre la CE et les paramètres Chlorures, Nitrates et Calcium

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.

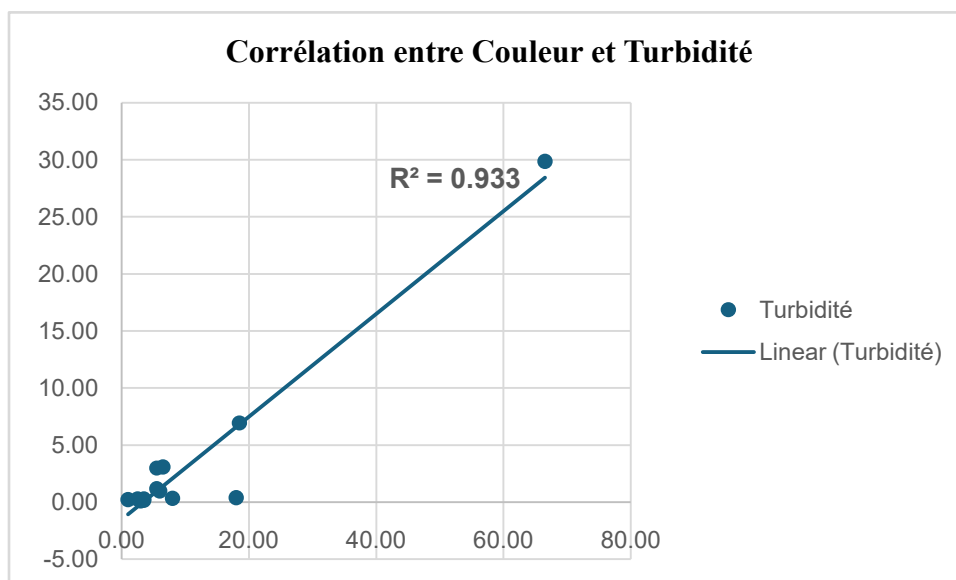


Figure 14 : Corrélation entre Couleur et Turbidité

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.

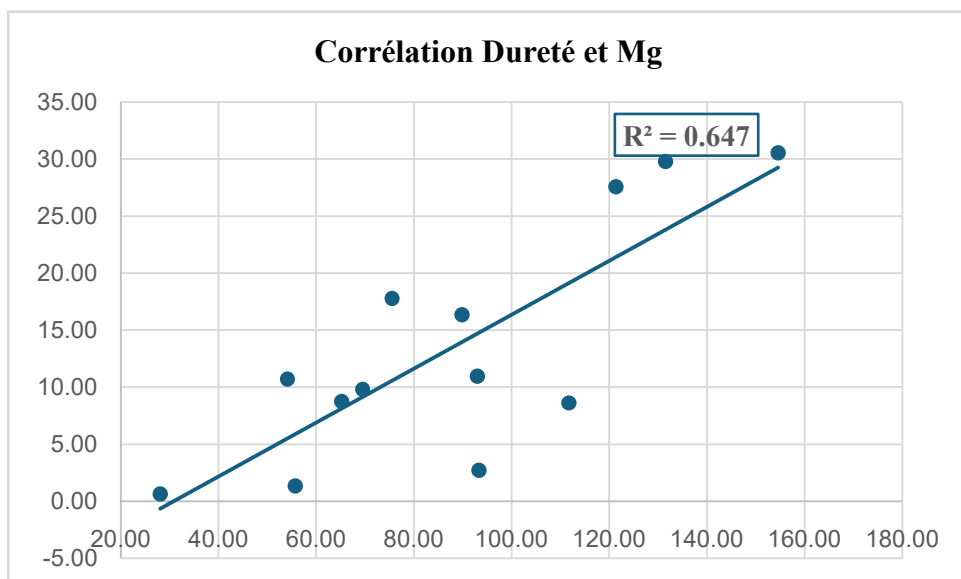


Figure 15 : corrélation entre Dureté et Magnésium

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 source 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.

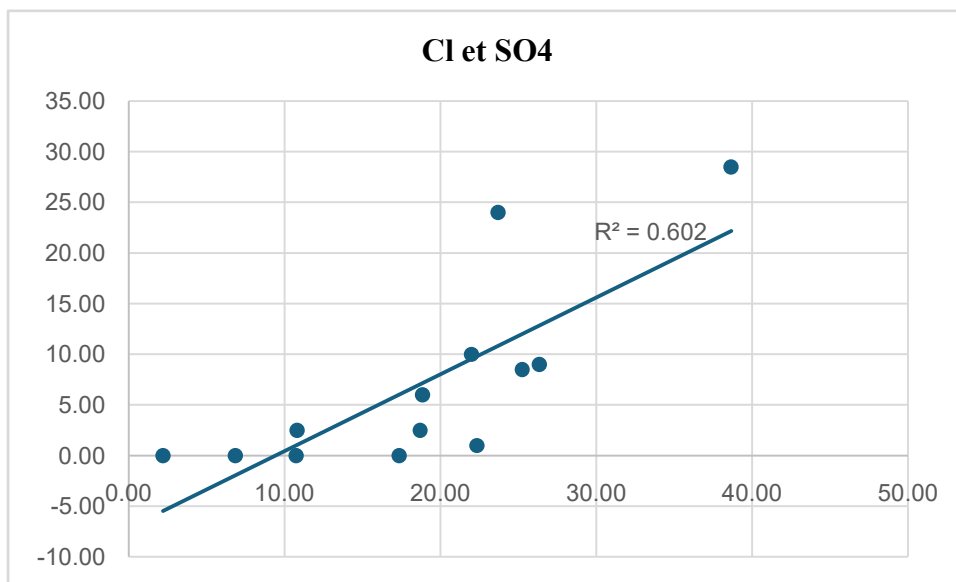


Figure 16 : corrélation entre les chlorures et les sulfates

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-roche 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

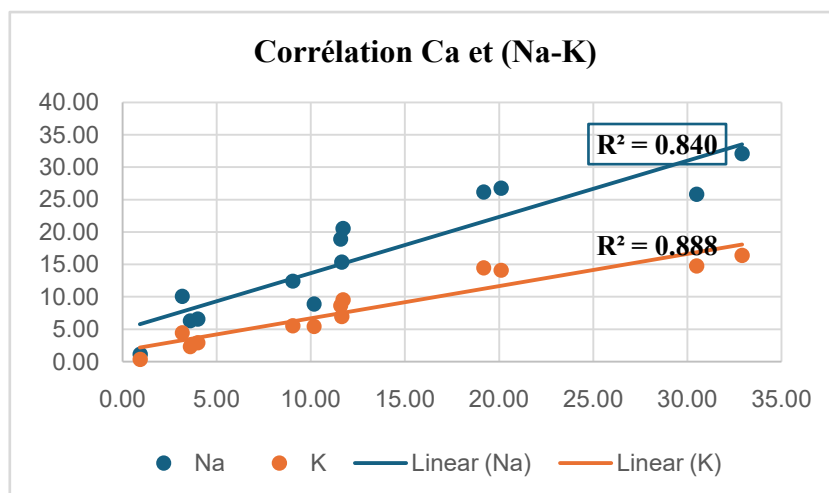


Figure 17 : corrélation entre le Calcium, le Sodium et le Potassium

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.

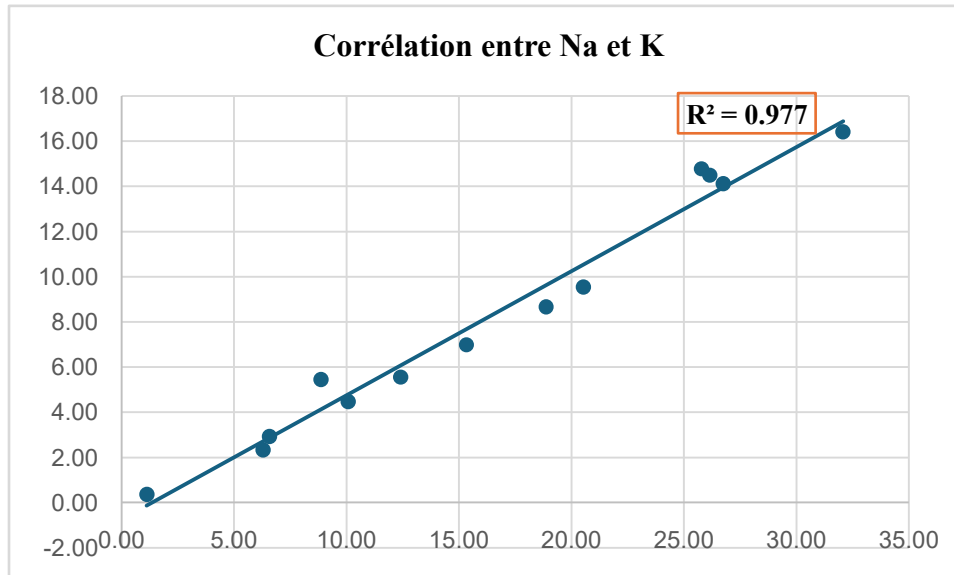
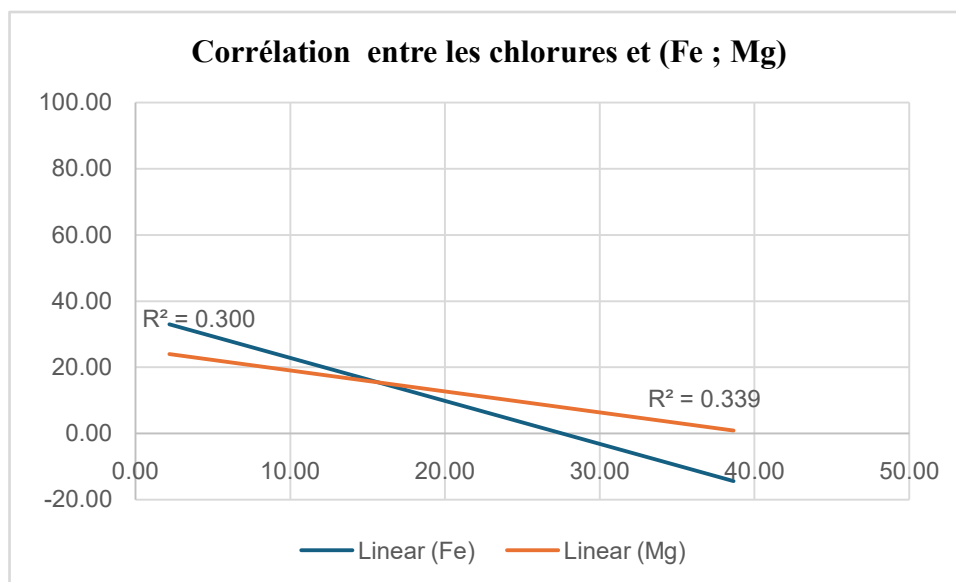


Figure 18 : corrélation entre le sodium et le potassium.

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

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.

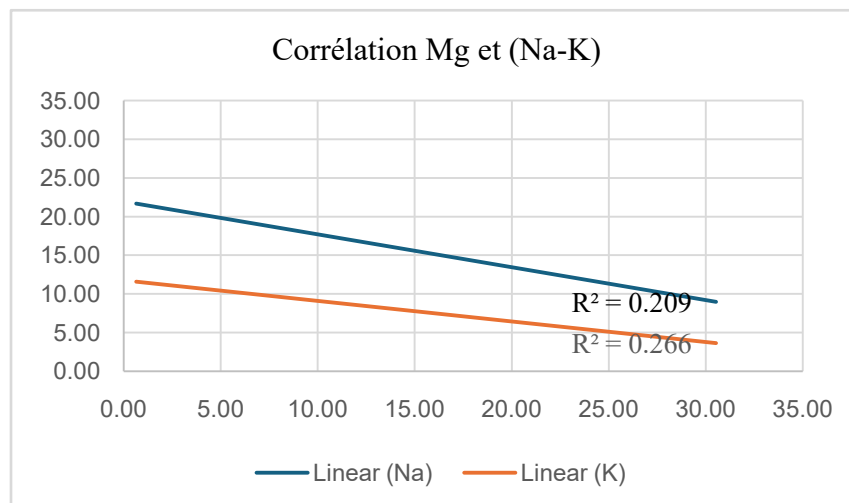


Figure 19 : corrélation entre Magnésium Sodium et Potassium

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 responsable 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, indique 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

Numéro composante	Valeur propre	Pourcentage de variance	Pourcentage cumulé
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.

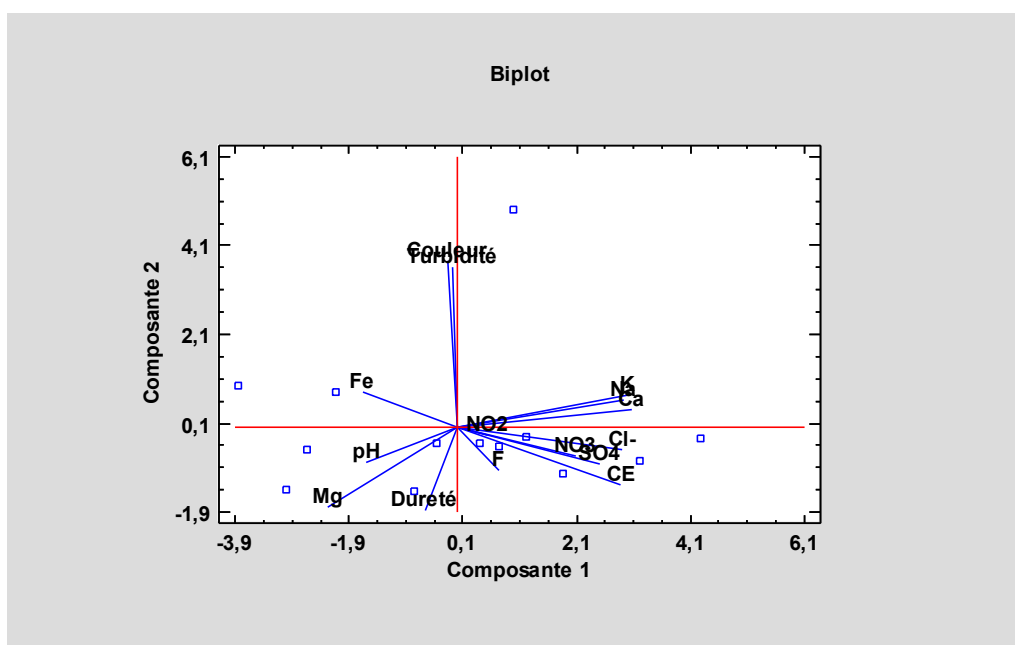


Figure 20 : composantes principales

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.

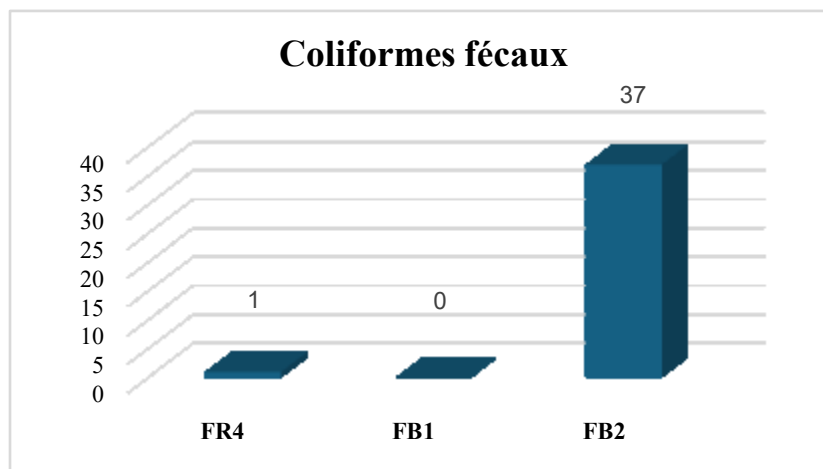


Figure 21 : Les coliformes fécaux dans les échantillons d'eau

Discussion:-

Les paramètres physico-chimiques des différents forages d'eau domestique sont discutés en relation avec les directives de l'OMS et comparés avec certains travaux similaires. 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 observées 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 analyses chimiques ont été confirmés 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). La prédominance du premier faciès traduit une alimentation récente des eaux souterraines, fortement contrôlée par la dissolution des minéraux silicatés et des produits d'altération des roches du socle (Lawal et al., 2022). Les ions calcium et magnésium proviennent essentiellement de l'altération des feldspaths calciques, des amphiboles, des pyroxènes et des minéraux ferromagnésiens présents dans les formations géologiques locales (Mohamed et al., 2025). À l'inverse, le faciès chloruré sodique-potassique traduit probablement une évolution hydrochimique plus avancée, caractérisée par des phénomènes d'échanges cationiques entre les argiles et l'eau, mais également par une influence anthropique liée aux activités domestiques. La coexistence de ces deux faciès confirme une certaine hétérogénéité des processus hydrochimiques au sein de la zone d'étude (Mohammed et al., 2022 ; Lawal et al., 2022 ; Razi et al., 2024 ; Mohamed et al., 2025). Les analyses microbiologiques ont été confirmées par (Mehounou et al., 2016; Talib, 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 (6,5) 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 liée à 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 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>
- Aram, S. A., Saalidong, B. M., & Osei Lartey, P. (2021). Comparative assessment of the relationship between coliform bacteria and water geochemistry in surface and ground water systems. *PLOS ONE*, 16(9), e0257715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257715>
- 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.
- BELAIZA, L., & LACHI, O. (2022). Synthèse bibliographique sur les modèles de classification des eaux naturelles : Cas des eaux de Bejaia, Ghardaïa et Tizi-Ouzou [Mémoire]. UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU.
- Benkreif, Y., Bourssace, Y., & Oumrani, A. (2023). Etude physico-chimique et bactériologique des eaux de source de la ville de Guelma [Mémoire Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma]. <http://dspace.univ-guelma.dz/jspui/handle/123456789/15148>
- Bouchemal, F. (2017). Diagnostic de la qualité des eaux souterraines et superficielles de la région de Biskra [Thèse]. Université Mohamed Khider – Biskra.
- Carrard, N., Foster, T., & Willetts, J. (2019). Groundwater as a Source of Drinking Water in Southeast Asia and the Pacific : A Multi-Country Review of Current Reliance and Resource Concerns. *Water*, 11(8), 1605. <https://doi.org/10.3390/w11081605>
- 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>
- Israilova, E., Voronina, A., & Shatila, K. (2023). Impact of water scarcity on socio-economic development. *E3S Web of Conferences*, 458, 08027. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345808027>
- 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>
13. 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>
 14. Lawal, A., Tijani, M., Snow, D., & D'Alessio, M. (2022). Quality and hydrochemical assessment of groundwater in geological transition zones : A case study from N.E. Nigeria. In Review.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1561340/v1>
 15. 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.
 16. 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.
 17. Mimouni, Y. (2020). Evaluations de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface de trois sous bassins de Tensift [Mémoire].
 18. Mishra, B., Kumar, P., Saraswat, C., Chakraborty, S., & Gautam, A. (2021). Water Security in a Changing Environment : Concept, Challenges and Solutions. Water, 13(4), 490. <https://doi.org/10.3390/w13040490>
 19. Mohamed, M., Zeinabou, M., Abdoulatif, A. S., Moussa, R. S., Maman, I. M., & Salifou, S. (2025). Hydrochemical Assessment of Water Quality and Risks Related to the Use of Groundwater Resources in the Urban Area of Niamey and Nearby Rural Areas in the Regions of Dosso and Tillabery in Niger. International Journal of Environment and Climate Change, 15(1), 178-202. <https://doi.org/10.9734/ijecce/2025/v15i14684>
 20. Mohammed, M. A. A., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2022). Multivariate statistical and hydrochemical approaches for evaluation of groundwater quality in north Bahri city-Sudan. Heliyon, 8(11), e11308.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11308>
 21. Mohtar, R., Peng, J., Daher, B., & He, X. (2024). Challenges and future actions on water-economy-ecology-society nexus under changing environment. River, 3(4), 337-340.
<https://doi.org/10.1002/rvr2.111>
 22. 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>
 23. OMS. (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson (OMS, Vol. 1-4).
 24. Razi, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2024). Hydrogeochemical evolution and water-rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia. Environmental Earth Sciences, 83(6), 164. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11477-6>
 25. 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.
 26. 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.
 27. 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.
 28. Singh, A. K., Das, S., Singh, S., Pradhan, N., Gajamer, V. R., Kumar, S., Lepcha, Y. D., & Tiwari, H. K. (2019). Physicochemical Parameters and Alarming Coliform Count of the Potable Water of Eastern Himalayan State Sikkim : An Indication of Severe Fecal Contamination and Immediate Health Risk. Frontiers in Public Health, 7, 174. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00174>
 29. Taliby, C. (2017). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des sources d'approvisionnement en eau dans la ville de Conakry. [Thèse]. UGANC.
 30. Thierrin, J., Steffen, P., Cornaz, S., Vuataz, F.-D., Balderer, W., & Looser, M. (2003). Echantillonnage des eaux souterraines (p. 84).
 31. 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>
 32. Wang, Y., & al. (2019). Groundwater Exploitation and Wetland Degradation in African Cities.

33. 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>
34. Weston, S. L., Nijhawan, A., Reddy, O., Kulabako, R., MacCarthy, J. M., Kayaga, S., & Howard, G. (2024). Improving access to urban piped drinking water services in Africa : A scoping review. *Water Supply*, 24(12), 4059-4076. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.251>
35. 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.