

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES
DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement
Laboratory of Hydrobiology and Environment

Importance de quelques facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des indicateurs de la contamination fécale des eaux souterraines à Leboudi (Région du Centre-Cameroun)

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Biologie des
Organismes Animaux

Option : Hydrobiologie et Environnement

Par :

GUEGUIM Milaine Ornela

Matricule : 19A2726

Licenciée ès-sciences

Sous la direction de :

MOUNGANG Luciane Marlyse

Maître de Conférences



Année 2025

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES

DEPARTMENT OF ANIMAL BIOLOGY AND PHYSIOLOGY

Laboratoire D'hydrobiologie Et Environnement

Laboratory Of Hydrobiology And Environment

**Importance de quelques facteurs abiotiques
sur la dynamique d'abondance des
indicateurs de la contamination fécale des
eaux souterraines à Leboudi (Région du
Centre-Cameroun)**

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Biologie des
Organismes Animaux

Option : Hydrobiologie et Environnement

Par :

GUEGUIM Milaine Ornela

Matricule : **19A2726**

Licenciée ès-sciences

Sous la direction de :

MOUNGANG Luciane Marlyse

Maître de Conférences

Année 2025

DEDICACE

À

Mes chers parents

REMERCIEMENTS

Je remercie le **Seigneur** pour la force, le courage et la patience qu'il m'a accordée tout au long de mon cursus scolaire et pour la réalisation de ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude au Professeur **NOLA Moïse**, Chef du Laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement, pour m'avoir accepté dans son équipe de recherche.

Je tiens à remercier le Professeur **MOUNGANG Luciane Marlyse**, pour avoir accepté de diriger ce travail. Je la remercie également pour ses différentes contributions à la réalisation dudit travail, notamment ses précieux conseils et encouragements ainsi que les critiques et suggestions apportées.

Je tiens aussi à remercier les enseignants du Département de Biologie et Physiologie Animales, en particulier, les Professeurs **KEKEUNOU Sévilor**, **FOMENA Abraham**, **AJEAGAH Gideon**, **ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert**, **NOAH EWOTI Olive Vivien**, **TAMSA Arfao Antoine** pour leurs enseignements et conseils.

Mes remerciements vont à l'endroit de tous les aînés du laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement en particulier **Drs MOUAFFO Edith et MESSOE William**, **Mmes et M, LADIBE Pélagie**, **ZAME Golda**, **KEGNE Loraine**, **POUTOUM Yves**, **BALENG Samuel**, **NDOURWE Bolivar**, **SONG Ronny** et **KAKABI Jordan**, pour leur conseil et assistance sur le terrain comme au laboratoire.

Toute ma gratitude à mon binôme de terrain **KAMENE MEDJOU Karmel** sans toutes fois oublier mes camarades de laboratoire et mes promotionnaires **MBO ZANG Donald**, **TUEKENG Paceli**, **MENGUE Bénédite**, **PENDA Mélodia**, **MALLA Yannick** pour leur assistance, leur disponibilité et l'esprit d'équipe dont ils ont fait preuve tout au long de ce travail.

L'occasion m'est aussi donnée de remercier ma très chère grande sœur **NGUEGUIM TEDJOU Ilde** et son époux **FOUODOP Michel**, mes frères **NGUEGUIM NGUETSOP Jordan**, **NGUEGUIM STAMO Aristol** et **NGUEGUIM KENFACK Duvalex**, sans oublier mes adorables enfants **MADJESSI Genesis** et **GUEGUIM Isaac**. Je suis également reconnaissante envers ma grande famille pour leur soutien multiforme et encouragement permanent. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **KEMBENG Emmanuel** pour son aide précieuse, son soutien inébranlable et ses encouragements constants.

Enfin, que tous ceux qui, de près ou de loin m'ont apporté une aide quelconque trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
RESUMÉ.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTERATURE	3
I-1- Généralités sur les eaux souterraines	3
I-1-1- Définition	3
I-1-2- Types d'eaux souterraines.....	3
I-1-3- Modes d'apparition des eaux souterraines	4
I-2- Origine de la pollution des eaux souterraines	4
I-2-1- Pollution physique	4
I-2-2- Pollution chimique	4
I-2-3- Pollution biologique.....	5
I-3- Généralités sur les coliformes	5
I-3-1- Coliformes totaux.....	5
I-3-2- Coliformes fécaux.....	6
I-4- Streptocoques fécaux	6
I-5- Critère d'appréciation de la qualité microbiologique des eaux	7
I-6- Quelques paramètres influençant la qualité microbiologique des systèmes aquatiques souterrains	8
I-6-1- Paramètres morphométriques.....	8
I-6-2- Paramètres physicochimiques des milieux aquatiques souterrains.....	8
I-7- Critères physicochimiques d'appréciation de la qualité des eaux	11
CHAPITRE II : SITE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES	12
II-1- Site d'étude	12
II-1-1- Présentation de la zone d'étude	12

II-1-2- Choix des points d'échantillonnage.....	12
II-1-3- Description des points d'échantillonnage.....	13
II-2- Matériel et méthodes	18
II-2-1- Matériel.....	18
II-2-2- Méthode	19
II-2-3- Détermination de l'origine probable de la contamination des eaux	20
II-2-4- Evaluation des paramètres morphométriques et physicochimiques des points d'échantillonnage susceptible d'influencer la dynamique d'abondance des indicateurs de la pollution fécale	20
II-2-5- Evaluation de l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des espèces bactériennes isolées	23
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	24
III-1- Résultats	24
III-1-1- Qualité microbiologique des eaux échantillonnées	24
III-1-2 Présentation des paramètres morphométriques et physicochimiques.....	30
III-2- Discussion	39
III-2-1- Variation des paramètres bactériologiques	39
III-2-2- Paramètres morphométriques	40
III-2-3 Paramètres physicochimiques.....	40
III-2-4 Liaison entre les paramètres évalués	42
CONCLUSION : RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	43

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP	: Analyses en Composante Principale
APHA	: American Public Health Agency
ARS	: Agence Régionale de Santé
BEA	: Bile Esculine Azide
BHAM	: Bactéries Hétérotrophes Aérobie Mésophiles
CDE	: Camerounaise Des Eaux
CEAEQ	: Centre d'Expertise en Analyses Environnementales du Québec
CF	: Coliformes fécaux
CT	: Coliformes totaux
FTU	: Formazin Turbidity Unit
GPS	: Global Positioning System
LDC	: Lysine DéCarboxylase
MES	: Matières En Suspension
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
PCA	: Plate Count Agar
PUD	: Plan d'Urbanisme Directeur
SF	: Streptocoques Fécaux
SPSS	: Statistical Package for Social Sciences
TDS	: Total Dissolved Solid
UC	: Unité Conventionnelle
UFC	: Unité Formant Colonie

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Photographie des cellules de <i>Escherichia coli</i> au microscope électronique à balayage.....	6
Figure 2 : Photographie des Streptocoques fécaux vue au microscope électronique à balayage.....	7
Figure 3: Cartographie et position des stations d'échantillonnage dans la localité de Leboudi.....	13
Figure 4 : Photographie des points d'eau souterraine étudiés.....	17
Figure 5 : Photographie des colonies bactériennes observées.....	24
Figure 6: Répartition quantitative des abondances relatives des groupes bactériens isolés pendant notre période d'étude.....	25
Figure 7 : Variation spatiale des abondances absolue des colonies.....	26
Figure 8 : Variation temporelle des abondances absolues des colonies isolées.....	27
Figure 9 : Variations spatio-temporelles des densités des bactéries isolées dans les eaux souterraines pendant la période d'étude.....	29
Figure 10: Variations spatio-temporelles du niveau piézométrique et de la hauteur de la colonne d'eau mesurées dans les puits pendant la période de l'étude.....	31
Figure 11: Variation des paramètres physiques mesurés pendant la période d'étude en fonction des stations.....	33
Figure 12 : Variation des paramètres chimiques mesurés pendant la période d'étude en fonction des stations.....	35
Figure 13 : valeur de l'ACP regroupant les affinités entre les abondances bactériennes et les paramètres abiotiques.....	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Normes de qualité microbiologique des eaux destinées à la consommation humaine.....	7
Tableau II: Normes de qualité physicochimique des eaux destinées à la consommation humaine.....	11
Tableau III : Synoptique des codes de dénominations, localisations, coordonnées géographiques, altitudes et source de pollutions ponctuelles des points d'échantillonnage étudiés.....	16
Tableau IV: Rapports coliformes fécaux sur streptocoques fécaux par points d'échantillonnage	30
Tableau V : Paramètres morphométriques des stations d'échantillonnage pendant la période d'étude.....	31
Tableau VI: Corrélations entre les variables bactériologiques, physicochimiques et morphométriques des différentes stations étudiées.....	37

RESUMÉ

Une étude visant à analyser l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des germes témoins de la contamination fécale dans les eaux souterraines à Leboudi (Région du Centre-Cameroun), a été réalisée pendant une période de six mois (Mai à Octobre 2024). Quinze stations (15) d'échantillonnage ont été sélectionnées sur la base de plusieurs critères et les échantillons d'eau destinés aux analyses bactériologiques et physicochimiques ont été prélevés en utilisant les techniques standards. Les bactéries témoins de contamination fécale ont été isolées par la technique de filtration sur membrane. Les Bactéries Hétérotrophes Aérobies Mésophiles (BHAM), ont également été isolées par la méthode d'étalement en surface. Les milieux de culture utilisés ont été la gélose ordinaire (Plate Count Agar) pour les BHAM, le milieu Bile Esculine Azide (BEA) pour les streptocoques fécaux, le milieu ENDO pour les coliformes totaux et coliformes fécaux. Les paramètres abiotiques tels que la température, le pH et la conductivité entre autres ont été mesurés suivant les techniques analytiques usuelles. Il en ressort que les eaux analysées sont légèrement acides ($6,91 \pm 0,19$ UC) avec une température peu variable et une faible minéralisation. Les analyses bactériologiques quant à elles ont relevé que les eaux de Leboudi hébergent une abondante flore bactérienne. Les densités des BHAM ont varié entre 3 et 7,07 (Log (UFC/100 mL)). De même, les densités moyennes des coliformes totaux, des coliformes fécaux et *Escherichia coli* ont été respectivement $2,91 \pm 1,31$ (Log (UFC/100 mL)) ; $1,37 \pm 0,32$ (Log (UFC/100 mL)) ; $0,40 \pm 0,19$ (Log (UFC/100 mL)), pour les streptocoques fécaux les densités moyennes ont été de $0,97 \pm 0,10$ (Log (UFC/100 mL)) dans ces eaux souterraines. Ces bactéries (Coliformes totaux et fécaux) pourraient causer des problèmes gastro-intestinaux à savoir la diarrhée, les crampes abdominales et les vomissements, des infections respiratoires et des infections cutanées (Streptocoques fécaux). D'après les rapports des densités CF/SF et dans une population où cohabitent les animaux et les êtres humains, la pollution des eaux de forage serait principalement d'origine animale, tandis que celle des puits et des sources provient surtout de l'activité humaine.

Des facteurs comme la température, le pH, les matières en suspension, la couleur, l'oxygène dissous, le dioxyde de carbone dissous, l'azote ammoniacal et les nitrates ont influencé la distribution de ces germes. La proximité des sources de pollution, l'infiltration des eaux contaminées dans les stations, l'utilisation des engrais biologiques (excréments de volaille) et de pesticides pour l'amendement des sols autour des stations, ainsi que le mauvais entretien points d'eau contribuent à la détérioration de la qualité de ces eaux. Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé, il est déconseillé de consommer ces eaux sans aucun traitement préalable.

Mots clés : Facteurs abiotiques, dynamique d'abondance, indicateurs de la contamination fécale, eaux souterraines.

ABSTRACT

Study aimed at analyzing the impact of abiotic factors on the abundance dynamics of indicator germs of fecal contamination in groundwater in Leboudi (Central Region of Cameroon) was conducted over a six-month period (May to October 2024). Fifteen (15) sampling stations were selected based on several criteria, and water samples intended for bacteriological and physicochemical analyses were collected using standard techniques.

Fecal contamination indicator bacteria were isolated using the membrane filtration technique. Heterotrophic Aerobic Mesophilic Bacteria (HAMBs) were also isolated using the surface spread method. The culture media used included Plate Count Agar for HAMBs, Bile Esculin Azide (BEA) medium for fecal streptococci, and ENDO medium for total and fecal coliforms. Abiotic parameters such as temperature, pH, and conductivity, among others, were measured using standard analytical techniques.

The results showed that the analyzed waters were slightly acidic (6.91 ± 0.19 pH units), with low temperature variability and weak mineralization. Bacteriological analyses revealed that the waters of Leboudi harbor an abundant bacterial flora. HAMB densities ranged between 3 and 7.07 (Log (CFU/100 mL)). Similarly, the average densities of total coliforms, fecal coliforms, and *Escherichia coli* were respectively 2.91 ± 1.31 (Log (CFU/100 mL)); 1.37 ± 0.32 (Log (CFU/100 mL)); and 0.40 ± 0.19 (Log (CFU/100 mL)). For fecal streptococci, the average densities were 0.97 ± 0.10 (Log (CFU/100 mL)) in these groundwater samples.

These bacteria (total and fecal coliforms) may cause gastrointestinal issues such as diarrhea, abdominal cramps, and vomiting, as well as respiratory infections and skin infections (fecal streptococci). Based on CF/SF density ratios and in a population where animals and humans coexist, borehole water pollution is mainly of animal origin, while pollution in wells and springs is primarily due to human activity.

Factors such as temperature, pH, suspended matter, color, dissolved oxygen, dissolved carbon dioxide, ammoniacal nitrogen, and nitrates influenced the distribution of these germs. The proximity of pollution sources, infiltration of contaminated water into stations, use of organic fertilizers (poultry droppings) and pesticides for soil amendment around the stations, as well as poor maintenance of water points, contribute to the deterioration of water quality. According to World Health Organization standards, consumption of these waters without prior treatment is not recommended.

Keywords: Abiotic factors, abundance dynamics, fecal contamination indicators, groundwater.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'eau est une ressource d'une importance capitale pour l'entretien de la vie (des plantes, des animaux et des Hommes) sur terre. Elle est indispensable pour l'Homme tant pour des besoins alimentaires que pour divers autres usages (agricoles, industriels ...) (UNICEF, 2021 ; Blanchon *et al.*, 2022).

Dans les grandes métropoles des pays en développement comme Yaoundé (Cameroun), l'explosion démographique entraîne l'expansion urbaine sans que le réseau d'adduction et de distribution d'eau potable ne suive (OMS, 2022). Face à cette situation, les habitants sont contraints de se tourner vers les eaux souterraines dont la qualité microbiologique est souvent inconnue. Des études ont montré que ces eaux peuvent être contaminées et causer divers problèmes de santé (Nougang *et al.*, 2011 ; Moungang *et al.*, 2013).

Au cours du XIXe siècle, les maladies transmises par l'eau ont été responsables de vastes épidémies de dysenterie, de diarrhée, de fièvre typhoïde, de choléra, entre autres (Bolot *et al.*, 2021). Ces maladies sont à l'origine d'un taux de mortalité très élevé des populations des pays en émergence (OMS 2022). La pollution de l'eau due à des microorganismes d'origine fécale est apparue très tôt dès que l'eau a été utilisée comme vecteur d'élimination des déchets (Moussima *et al.*, 2020). La contamination de l'homme se réalise soit par consommation d'eau de boisson, soit par consommation d'aliments contaminés par l'eau, soit encore lors d'un bain ou d'un contact avec des eaux à usage récréatif (WHO, 2022). Les indicateurs microbiologiques sont considérés parmi les paramètres les plus importants pour les eaux à usage domestique (Guerrouf, 2023).

Au Cameroun, de nombreux travaux sur la qualité des eaux ont été réalisés principalement dans les grandes métropoles (Yaoundé, Douala). Ces études ont montré que ces eaux sont de mauvaise qualité et hébergent des germes témoins de contamination fécales (Noah Ewoti *et al.*, 2021a, 2021b). Elles montrent également que ces eaux abritent une microflore bactérienne diversifiée, dont la dynamique d'abondance varie selon l'espace et le temps (Nola *et al.*, 2011 ; Tamsa Arfao *et al.*, 2021a ; Noah Ewoti *et al.*, 2021b). Les puits, les forages et les sources représentent les trois principales sources d'approvisionnement en eau (Vilagenès, 2003). Mais elles deviennent polluées en raison du manque de systèmes sanitaires, des mauvaises habitudes de gestion des déchets et de la présence de latrines à proximité des sources d'eau (Djaouda *et al.*, 2018 ; Moussima *et al.*, 2020). De même il a été montré que la majorité des eaux souterraines contenaient des germes indicateurs de pollution fécale avec des proportions élevées, et non recommandables pour la consommation humaine (Longtchi Segnou *et al.*, 2023 ; Baleng *et al.*, 2022a ; Bomgning *et al.*, 2022).

Malgré ces informations, la qualité microbiologique des eaux souterraines des banlieues des reste jusqu'ici très peu abordée. De plus, l'influence des paramètres physicochimiques de l'eau sur la variation bactérienne est insuffisamment documentée. De même, on sait peu de chose sur l'origine probable de la contamination microbienne de ces eaux.

La présente étude a pour objectif général d'analyser l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des germes témoins de la contamination fécale dans les eaux souterraines à Leboudi (Centre – Cameroun).

Spécifiquement il s'agit :

- d'évaluer la dynamique d'abondance des bactéries témoins de contamination fécale dans les eaux souterraines à Leboudi ;
- de déterminer l'origine probable de la contamination microbienne de ces différents points d'eau ;
- de mesurer quelques variables morphométriques et physicochimiques susceptibles d'influencer ces paramètres microbiologiques.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres. Le premier chapitre traite de la revue de la littérature. Le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisés. Le troisième et dernier chapitre présente les principaux résultats obtenus, leur interprétation et leur discussion. Une conclusion, quelques recommandations et perspectives qui en découlent, clôturent ce mémoire.

CHAPITRE I : REVUE DE LA LITTÉRATURE

I-1- Généralités sur les eaux souterraines

I-1-1- Définition

Les eaux souterraines sont celles qu'on trouve sous la surface du sol, à l'état liquide ou à l'état gazeux. Elles résultent du séjour dans le sol des eaux en perpétuel déplacement dans l'environnement (Abahi *et al.*, 2020). Leur accumulation en profondeur donne naissance aux nappes d'eaux souterraines. La formation des eaux souterraines implique plusieurs processus naturels très complexes (Rodriguez, 2017). On attribue en partie la formation de ces eaux souterraines à l'infiltration des précipitations atmosphériques dans les terrains (théorie de l'infiltration) (Essouli, 2021). La vitesse des infiltrations est fonction de la perméabilité du sol et est contrôlée par la porosité du matériau géologique. L'infiltration de l'eau est rapide dans les sols constitués en majorité de graviers et de sable, et lente dans les sols argileux et limoneux (Roose *et al.*, 2010). Les eaux souterraines seraient également formées par la vapeur d'eau de l'air qui pénètre dans les terrains, selon la deuxième théorie. Par la suite, cette vapeur d'eau se condenserait dans des conditions de température spécifiques (théorie de la condensation). Selon la troisième théorie appelée théorie juvénile, les eaux souterraines sont issues de la vapeur d'eau et des émanations gazeuses générées par le magma dans les profondeurs de la terre. Ces vapeurs d'eau en s'élevant vers les couches superficielles de l'écorce terrestre, se condensent et forment de l'eau juvénile. Enfin, la théorie des eaux reliques préconise que les eaux souterraines des zones profondes sont des eaux résiduelles des bassins anciens qui ont été enterrés dans les terrains de remblaiement et ont conservé leur aspect primitif jusqu'à l'époque actuelle (Arfib, 2022).

I-1-2- Types d'eaux souterraines

I-1-2-1- Nappes libres ou phréatiques

Les nappes libres sont des nappes d'eaux souterraines dont le niveau piézométrique, peu profond, s'établit uniquement en fonction de la perméabilité du terrain à travers lequel pénètre l'eau d'infiltration. Ce sont les nappes les plus proches de la surface dont les eaux sont tributaires des variations pluviométriques et sont plus exposées aux pollutions de toute nature (Boutin, 2012).

I-1-2-2- Nappes captives ou géologiques

Les nappes captives ou géologiques sont des nappes les plus profondes, emprisonnées entre deux couches de terrain imperméables (Ghaleb et Mokrani, 2019). Ces nappes sont à l'abri de toute pollution d'origine superficielle et dont le volume des eaux présentes varie peu.

I-1-3- Modes d'apparition des eaux souterraines

Les eaux souterraines peuvent être accessibles directement au niveau des sources, ou indirectement à travers des puits. Une source est une ouverture à la surface ou près de la surface de la terre par laquelle les eaux souterraines s'écoulent. Elle se forme lorsque l'eau d'un aquifère atteint la surface de la terre par une ouverture naturelle dans le sol (Hill & PA^{TEL}, 2023).

Les puits sont des trous creusés dans la Terre pour amener l'eau et d'autres fluides souterrains à la surface. Il existe plusieurs types de puits utilisés pour l'extraction de l'eau, les principaux sont :

- **Les puits creusés** : Communément appelés « puits », il s'agit du type de puits le plus simple, qui consiste à creuser un trou dans le sol jusqu'à ce que l'eau soit atteinte. Ils sont généralement peu profonds et peuvent être recouverts de pierres ou de briques.
- **Les puits foncés** : Aussi appelés « puits à pointe filtrante », ces puits sont réalisés en enfonçant un tuyau dans le sol jusqu'à ce qu'il atteigne un aquifère. Ils ont généralement une profondeur inférieure à 15 mètres et peuvent être installés rapidement.
- **Les puits forés** : Communément appelés « forages » ces puits sont réalisés en forant un trou dans le sol à l'aide d'un appareil de forage. Ils peuvent atteindre des centaines de mètres de profondeur et fournir de grandes quantités d'eau (Misstear *et al.*, 2017).

I-2- Origine de la pollution des eaux souterraines

Les causes et les mécanismes de la pollution de l'eau d'un puits, d'une source ou d'une nappe phréatique dans son ensemble peuvent être multiples. Généralement, la contamination des eaux souterraines est d'origine agricole, industrielle ou domestique (Kpiagou *et al.*, 2022). Le manque d'hygiène et la non application des mesures d'assainissement, notamment l'absence de système de collecte, d'évacuation et traitement des ordures ménagères, sont des voies de contamination des eaux superficielles et souterraines (Agassounon *et al.*, 2012). La pollution causée peut ainsi être d'ordre physique, chimique ou biologique (Moussa, 2014).

I-2-1- Pollution physique

En milieu aquatique souterrain, la pollution physique est matérialisée par des changements des propriétés physiques de l'eau. Il s'agit par exemple des variations de la charge des matières en suspension, de la température de l'eau, de la couleur ou de la transparence de l'eau (Noah Ewoti, 2012).

I-2-2- Pollution chimique

La pollution chimique des eaux souterraines peut être ponctuelle ou diffuse; La pollution chimique dans un milieu aquatique est souvent attestée par la mesure de son pH et de sa conductivité électrique entre autres. Elle est apportée par les substances nocives de nature minérale et organique qui sont déversées de manière accidentelle ou de façon consciente dans

les écosystèmes (Moussa, 2014). Les teneurs élevées en ortho-phosphates, en ion ammonium, nitrate et MES dans les eaux indiquent une pollution conséquente (Arfao *et al.*, 2021b).

I-2-3- Pollution biologique

La pollution biologique des eaux souterraines est souvent évaluée par la mesure de certains paramètres dont la teneur en chlorophylle, la demande en oxygène par les microorganismes et l'évaluation des bio-indicateurs de pollution entre autres. De nombreux microorganismes pathogènes isolés dans les eaux souterraines proviendraient des fosses septiques, des épandages d'eaux usées et des cimetières (Nola *et al.*, 2012 ; Lontchi Segnou *et al.*, 2023). La pollution biologique se traduit dans les milieux aquatiques par la présence de microorganismes transmis par l'eau et responsables de nombreuses maladies hydriques. Les microorganismes le plus souvent impliqués sont les bactéries, les virus, les champignons et parasites entre autres (Moussa, 2014).

I-3- Généralités sur les coliformes

Les Coliformes sont des groupes de bactéries généralement présents dans l'environnement, notamment dans le sol, l'eau et les matières fécales des animaux et des humains. Ils sont souvent utilisés comme indicateurs de la contamination fécale dans les tests de qualité de l'eau, ils sont également utilisés comme indicateur d'évaluation de l'efficacité des traitements de l'eau comme la filtration ou la chloration, car leur présence peut signaler une possible présence d'agents pathogènes. Les coliformes décrivent des bactéries à coloration de gram négative fermentant le lactose avec production de gaz à 35-37 °C en 48 h, ce sont des bacilles non sporulant, donnant une réponse négative au test à l'oxydase, aérobies ou anaérobies facultatives, capables de cultiver en présence de sels biliaires ou équivalents (Lontchi Segnou *et al.*, 2023). Ce groupe est basé sur des propriétés biochimiques et morphologiques et n'entre pas dans la classification conventionnelle des bactéries (taxonomie). Il comprend des bactéries de la famille des Entérobactéries qui habitent les intestins des animaux à sang chaud mais aussi d'autres microorganismes de l'environnement naturel (Lontchi Segnou *et al.*, 2023).

On distingue deux grands sous-groupes de coliformes à savoir coliformes totaux et coliformes fécaux.

I-3-1- Coliformes totaux

Les coliformes totaux possèdent la β -galactosidase qui permet l'hydrolyse du lactose (Santé Canada 2012). Leur présence dans l'eau n'indique pas nécessairement une contamination fécale, ni un risque sanitaire, mais traduit plutôt une détérioration de la qualité de l'eau (Lontchi Segnou *et al.*, 2023). Ils permettent aussi de connaître le niveau de pollution d'origine organique dans les eaux souterraines. Les coliformes totaux sont principalement utiles

comme indicateurs de l'efficacité du traitement, de l'intégrité du réseau de distribution ainsi que comme indicateurs de la croissance bactérienne après traitement (CEAEQ, 2015).

I-3-2- Coliformes fécaux

Les coliformes fécaux, ou coliformes thermotolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5°C. Bien que la présence de coliformes fécaux témoigne habituellement d'une contamination récente d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale, ils proviennent plutôt d'eaux enrichies en matière organique, tels les effluents industriels du secteur des pâtes et papiers ou de la transformation alimentaire (Lontchi Segnou *et al.*, 2023). L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *Escherichia coli* (Edberg *et al.*, 2000 ; Lontchi Segnou *et al.*, 2023). *Escherichia coli* a été la première décrite comme responsable des diarrhées. Actuellement, les gastro-entérites dues à cette bactérie sévissent fréquemment dans de nombreux pays en voie d'émergence où elles pourraient représenter la première ou la seconde cause de diarrhées infantiles (Elbing et Brent, 2019). Elle peut être isolée et dénombrée sur divers milieux tels que la gélose ENDO, MacConkey, MacConkey au Sorbitol et EMB. *Escherichia coli* appartient au genre *Escherichia*, de la famille des Enterobacteriaceae elle-même faisant partie de l'ordre des Enterobacterales et de l'embranchement des Proteobactéries. La figure 1 présente une Photographie des cellules de *Escherichia coli* au microscope électronique à balayage.



Figure 1 : Photographie des cellules de *Escherichia coli* au microscope électronique à balayage (Jubelin, 2005).

I-4- Streptocoques fécaux

Le terme streptocoques fécaux fait référence aux streptocoques communément présents dans les selles des humains et animaux. Ils appartiennent aux genres *Enterococcus* et *Streptococcus*. Les streptocoques sont un sous-groupe du genre *Streptococcus* (Gijo *et al.*, 2015). C'est une bactérie ronde ou ovoïde, non sporulant qui se présente sous forme de coque isolée ou arrangée, en paire ou en chaîne plus ou moins longue et dont le diamètre mesure 0,5 à 0,9 µm (Taban *et al.*, 2014). Streptocoques fécaux ou encore *Enterococcus faecalis* est une coque à Gram positif, anaérobie aérotoleant. Les streptocoques fécaux peuvent se trouver

dans les estomacs et les intestins des humains et des animaux. Ils peuvent être distingués en raison de leur grande capacité de résistance, comme indicateur de contamination fécale afin de tester la qualité hygiénique des échantillons environnementaux (Taban *et al.*, 2014). Ils provoquent des maladies telles que les gastro-intestinaux, des infections cutanées, la pneumonie bactérienne, l'infection de l'oreille et la méningite bactérienne. Les colonies de streptocoques sont petites et translucides, avec un halo noir très distinct dans le milieu BEA (Bile Esculine Azide) (OMS, 2011). La figure 2 présente une vue morphologique des streptocoques fécaux vue au microscope électronique à balayage.



Figure 2 : Photographie des Streptocoques fécaux vue au microscope électronique à balayage (Taban *et al.*, 2014).

I-5- Critères d'appréciation de la qualité microbiologique des eaux

La qualité microbiologique d'une eau est généralement définie par des normes qui fixent les concentrations maximales pour certains microorganismes susceptibles d'être présents dans l'eau. Le tableau II résume les normes de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2004).

Tableau I: Normes de qualité microbiologique des eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2004).

	Paramètres	Concentration maximale admissible
Paramètres Microbiologiques	Germes aérobies revivifiables à 22°C	100 UFC/ mL
	Coliformes totaux	20 UFC/100 mL
	Coliformes fécaux	0 UFC/100 mL
	Streptocoques fécaux	0 UFC/100 mL
	Bactéries sulfito-réductrices et les spores	0 UFC/50 mL
	Salmonelles	0 UFC/5 L
	Staphylocoques pathogènes	0 UFC/100 mL
	Autres bactéries fécales	0 UFC/50 mL

I-6- Quelques paramètres influençant la qualité microbiologique des systèmes aquatiques souterrains

I-6-1- Paramètres morphométriques

I-6-1-1- Profondeur des puits et forages

La profondeur des puits et des forages joue un rôle crucial dans la qualité microbiologique des eaux souterraines. Les puits plus profonds sont généralement moins susceptibles d'être contaminés par des sources de pollution de surface, mais peuvent encore être affectés par des contaminants chimiques et biologiques présents en profondeur (APHA, 2009).

I-6-1-2- Hauteur de la Margelle

La hauteur de la margelle est importante pour protéger l'eau des contaminations de surface, telles que les ruissellements contenant des déchets animaux ou des produits chimiques agricoles. Une margelle bien construite et suffisamment élevée peut réduire les risques de contamination bactérienne (Rodier *et al.*, 2009).

I-6-1-3- Hauteur de la Colonne d'Eau

La hauteur de la colonne d'eau est un indicateur de la quantité d'eau disponible dans le puits ou le forage. Une colonne d'eau plus haute peut diluer les contaminants présents, tandis qu'une colonne plus basse peut concentrer les contaminants (Lee et Kim 2018).

I-6-1-4- Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique influence la qualité microbiologique des eaux souterraines en affectant la profondeur à laquelle les contaminants peuvent pénétrer. Un niveau piézométrique élevé peut indiquer une recharge rapide des eaux souterraines, ce qui peut entraîner une infiltration rapide de contaminants microbiologiques (Rodier *et al.*, 2009).

I-6-2- Quelques paramètres physicochimiques des milieux aquatiques souterrains

I-6-2-1- Paramètres physiques

I-6-2-1-1- Température des eaux

La température est la mesure de la chaleur ou du froid de l'eau. La température des eaux influence leur densité, leur viscosité, la solubilité des gaz, la dissociation des sels dissous, la conductivité électrique et le pH (Rodier *et al.*, 2016). La température de l'eau est un facteur important car il régit presque toutes les réactions physiques, chimiques et bactériologiques. Une variation soudaine de ce paramètre provoque une perturbation de l'équilibre de l'écosystème aquatique et influence principalement les variations climatiques. La variation de la température

d'une eau est liée à la température de l'air, à la topographie, à l'insolation et à sa profondeur (Noah Ewoti *et al.*, 2021a).

I-6-2-1-2- Couleur

Fondamentalement, l'eau est incolore dans une large mesure, la couleur de l'eau est toujours due à la présence de matière étrangère. La couleur est une variable de pollution esthétique due à la minéralisation et la présence de substances humiques, les métaux ou des déchets de différents types dans l'eau et de composés chimiques tels que des colorants (Rodier *et al.*, 2009).

I-6-2-1-3- Solides totaux dissous (TDS)

Les solides totaux dissous sont les sels inorganiques et les petites quantités de matières organiques qui sont dissous dans l'eau. Leurs principaux constituants sont habituellement les cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et les anions (carbonates, bicarbonates, chlorures, sulfates et les nitrates) (Rodier *et al.*, 2009).

I-6-2-1-4- Matières en suspension (MES)

On appelle matière en suspension toute particule fine en suspension. Les matières en suspension sont fonction de la nature des terrains traversés par les eaux pluviales, du régime d'écoulement des eaux, de la pluviométrie et de la nature des rejets (Rodier *et al.*, 2016). Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres microorganismes de l'eau. Les matières en suspension donnent un aspect trouble à l'eau, affectent la transparence, diminuent la pénétration de la lumière et par conséquent, la photosynthèse. Les concentrations élevées favoriseraient la prolifération des micro-organismes pathogènes (Amenan *et al.*, 2021).

I-6-2-2- Paramètres chimiques

I-6-2-2-1- Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH indique l'acidité ou la basicité de l'eau. Le pH est généralement lié à la température de l'eau, à la salinité, à l'oxygène et au gaz carbonique dissous (Tchakonté, 2016). Le pH de l'eau dépend de la nature des terrains traversés, par la décomposition de la matière organique. Il est acide dans les aquifères sableux ou granitiques et est alcalin dans les eaux des aquifères calcaires. Il est connu que les variations du pH affectent les processus chimiques et biologiques dans l'eau. Un pH faible augmente la biodisponibilité des métaux et de diverses toxines tandis qu'un pH élevé peut être dû à la présence de polluants introduits dans l'eau (Urien, 2015).

I-6-2-2-2- Conductivité électrique

La conductivité électrique est proportionnelle à la teneur des eaux en sels dissous ; elle renseigne sur le degré de minéralisation globale des eaux. La température et la concentration en ions influencent positivement la conductivité par action directe sur la mobilité des sels en augmentant le taux de salinité (Kambiré *et al.*, 2014). La pollution des eaux peut se traduire par une augmentation de la conductivité et des sels dissous et donc, une augmentation des TDS (Zébazé Togouet *et al.*, 2014). Elle est susceptible d'influencer ainsi la multiplication des microorganismes.

I-6-2-2-3- Oxygène dissous

L'oxygène dissous indique le volume dioxygène (O₂) présent dans l'eau. Sa présence en milieu aquatique provient principalement de la dissolution de l'oxygène de l'air et de l'activité photosynthétique des végétaux aquatiques. C'est l'un des paramètres indispensables à la vie aquatique et constitue un excellent indicateur de la qualité physico-chimique de l'eau. La variation de sa valeur permet d'indiquer le degré de pollution d'une eau (Merbouh *et al.*, 2020).

I-6-2-2-4- Gaz carbonique dissous

Le gaz carbonique dissous provient essentiellement de la dissolution du CO₂ atmosphérique et de la respiration des organismes vivants. La quantité de gaz carbonique que peut contenir une eau est limitée par l'état de saturation, lui-même dépendant de la pression atmosphérique, de la température et de la teneur en salinité (Rodier *et al.*, 2009).

I-6-2-2-5- Orthophosphates (PO₄³⁻)

Les orthophosphates ou « phosphore réactif » représentent la forme de phosphate biodisponible dans les milieux aquatiques (Rodier *et al.*, 2016). Une concentration élevée en orthophosphates dans les eaux naturelles est l'indice d'une pollution par les eaux usées et effluents industriels contenant des phosphates organiques et des détergents synthétiques (Abowei *et al.*, 2010 ; Bhat *et al.*, 2017).

I-6-2-2-6- Composés azotés

Dans les hydrosystèmes, l'azote se trouve sous forme organique, tel que l'azote ammoniacal (NH₄⁺), nitrates (NO₃⁻), ou associé à d'autres composés. Dans la nature, l'azote provient du sol et de la minéralisation de la nécromasse. Toutefois, l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement de l'eau en cet élément par apport d'effluents urbains et industriels, rejet d'eaux usées domestiques, lessivage des sols agricoles fortement enrichis en engrais (Rodier *et al.*, 2016). La teneur en NH₄⁺ est très élevée dans les eaux riches en matières

organiques lorsque le pourcentage de saturation en oxygène est insuffisante pour assurer sa transformation (Togue *et al.*, 2017).

I-7- Critères physicochimiques d'appréciation de la qualité des eaux

La qualité physicochimique d'une eau est généralement définie par des normes qui fixent les concentrations maximales pour certaines substances nocives susceptibles d'être présentes dans l'eau. Le tableau III résume les normes de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2004).

Tableau II: Normes de qualité physicochimique des eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2004).

	Paramètres	Concentration maximale admissible
Paramètres Organoleptiques	Couleur	15 Pt/Co
	Odeur	0 (à 25°C) taux de dilution 3
	Saveur	0 (à 25°C) taux de dilution 3
Paramètres physico-chimiques	pH	$6,5 \leq \text{pH} \leq 9$
	Conductivité électrique	$180 \leq \text{conductivité} \leq 100 \mu\text{s/cm}$
	Sulfates	250 mg/L
	Magnésium	50 mg/L
	Sodium	200 mg/L
Paramètres chimiques indésirables	Potassium	12 mg/L
	Ammonium	0,5 mg/L
	Nitrates	50 mg/L
	Nitrites	0,1 mg/L
	Matières organiques	5 mg/L
	Manganèse	0,05 mg/L

CHAPITRE II : SITE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES

II-1- Site d'étude

II-1-1- Présentation de la zone d'étude

Leboudi est un village de chefferie 3^{ème} degré, situé dans l'arrondissement d'Okola, département de la Lekié, région du Centre (Cameroun). Leboudi se trouve à 3°54'55.66" N et 11°26'33.59" E, à une altitude de 795 mètres, entre le département du Mfoundi et celui de la Lekié. Le site se trouve dans une zone forestière à régime climatique bimodal avec 04 saisons constituées de deux saisons des pluies et deux saisons sèches. La température moyenne est de 23,5°C et la pluviométrie totale annuelle est de 831 mm (Abossolo *et al.*, 2015).

II-1-2- Choix des points d'échantillonnage

Dans la localité de Leboudi, l'étude a porté sur les eaux de forages, puits et sources. Les points de prélèvements ont été choisis de façon motivé par les critères suivants :

- L'accessibilité à ces points d'eau ;
- L'intérêt du point d'eau pour les populations riveraines ;
- Le niveau de protection de ces points d'eau ;
- Le désir de couvrir toute la zone d'étude.

Sur la base de ces critères, quinze points de prélèvement ont été retenus dans différents quartiers de ladite localité. Il s'agit de :

- 06 points d'eau de forage codés par F1, F2, F3, F4, F5, F6 ;
- 06 points d'eau de puits codés par P1, P2, P3, P4, P5, P6 ;
- 03 points d'eau de sources codés par S1, S2, S3.

La figure 3 représente les positions, la répartition et une vue panoramique des points d'échantillonnages.

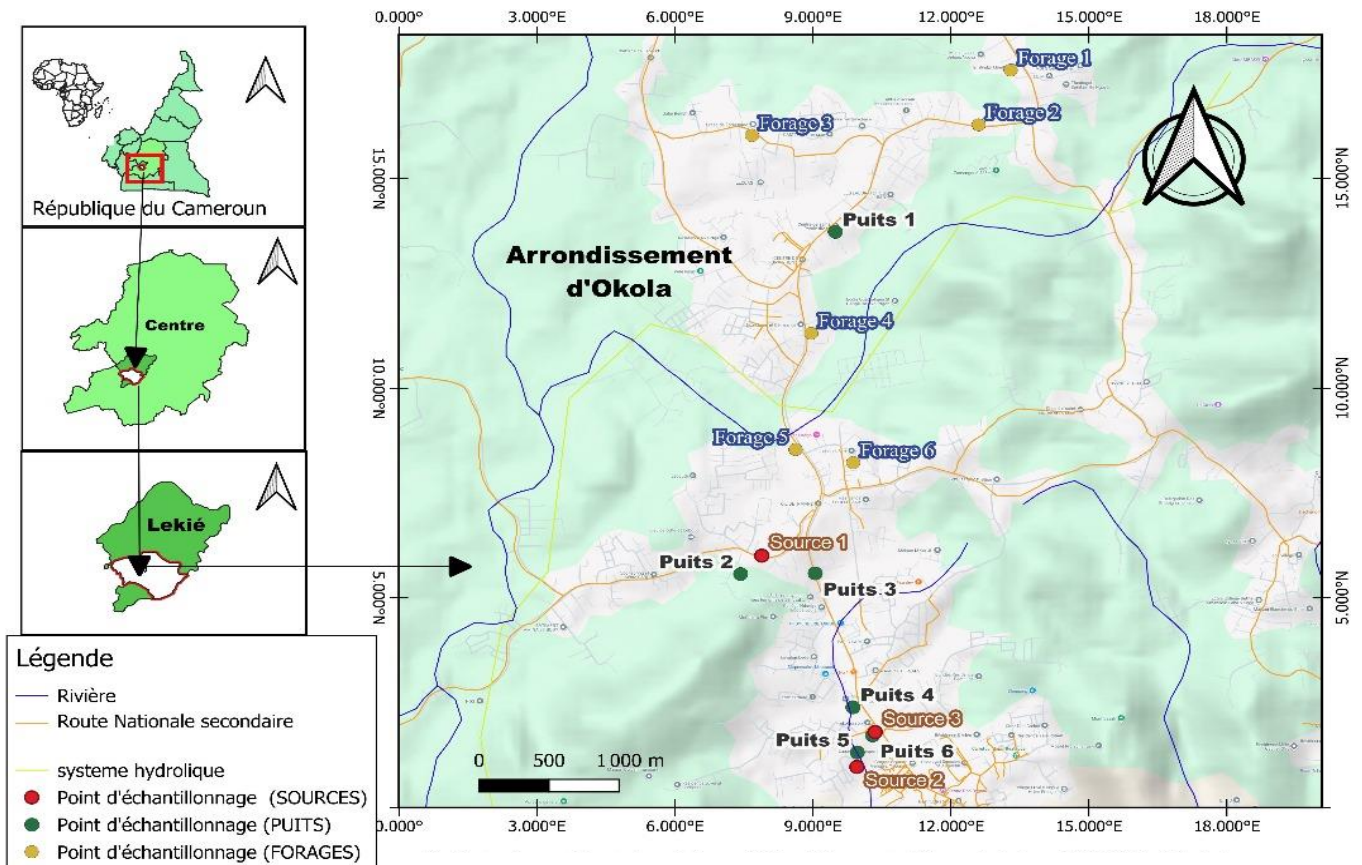


Figure 3: Cartographie et position des stations d'échantillonnage dans la localité de Leboudi (Ibrahim, 2024).

II-1-3- Description des points d'échantillonnage

➤ Forage F1

Le site F1 situé au contrôle de police de Leboudi sur une surface plane est un forage de coordonnées géographiques ($3^{\circ}56'59,784''N$, longitude $11^{\circ}27'28,33812''E$ et altitude 806m). Il présente une ceinture de sécurité en parpaing. On note une légère activité agricole et quelques habitations en amont. On y accède par voie bitumée, l'eau est utilisée pour la boisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ Forage F2

Le site F2 situé juste après le carrefour Zamengoe à proximité de la route est un forage de coordonnées géographiques latitude ($3^{\circ}56'46,248''N$, longitude $11^{\circ}27'17,82612''E$ et altitude 804m). Il présente une ceinture de sécurité en parpaing. On note une absence d'activité agricole mais quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la boisson, la lessive et la vaisselle (Figure 4).

➤ Forage F3

F3 situé en face du Lycée Bilingue de Zamengoe sur une surface plane est un forage de coordonnées géographiques (latitude $3^{\circ}56'43,25388''N$, longitude $11^{\circ}26'27,99708''E$ et altitude 804m). Il présente une ceinture de sécurité en parpaing. On note une activité agricole

importante, quelques habitations et un établissement scolaire dans les environs. L'eau est utilisée principalement pour la boisson par les élèves de l'établissement, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Puits P1**

P1 situé à Total Ngoya est un puits sur un terrain en pente de coordonnées géographiques (latitude 3°56'18,17988''N, longitude 11°26'47,20812''E et altitude 793m). On note principalement une latrine en amont, une activité agricole importante et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée principalement pour la cuisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Forage F4**

F4 situé au dépôt de bois de Leboudi est un forage de coordonnées géographiques (latitude 3°56'9,474''N, longitude 11°26'31,218''E et d'altitude 806m). On note une légère activité agricole et plusieurs habitations aux environs. L'eau est utilisée principalement pour la boisson, la lessive, et la vaisselle (Figure 4).

➤ **Forage F5**

F5 situé à Leboudi 1 à 100m de la route sur une pente est un forage de coordonnées géographiques latitude (3°55'54,12612''N, longitude 11°26'40,13988''E et altitude 783m). Elle présente une ceinture de sécurité en parpaing. On note une absence d'activité agricole mais quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la boisson, la lessive, et la vaisselle (Figure 4).

➤ **Forage F6**

F6 situé à la chefferie de Leboudi est un forage de coordonnées géographiques (latitude 3°55'23,05812''N, 11°26'37,69188''E et altitude 789m). On note une légère activité agricole et plusieurs habitations aux environs. L'eau est utilisée principalement pour la boisson, la lessive, et la vaisselle (Figure 4).

➤ **Puits P2**

P2 situé au centre de santé H est un puits en bordure de route de coordonnées géographiques latitude 3°55'20,43012''N, longitude 11°26'49,81812''E et d'altitude 793m. On note principalement une absence de couvercle, une activité agricole importante et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la cuisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Source S1**

S1 située quartier Mebongo est une source en bordure de route de coordonnées géographiques latitude 3°54'54,68412''N, longitude 11°26'24,443888''E, et d'altitude 794m.

On note principalement une absence de couvercle, une activité agricole importante et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la cuisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Puits P3**

P3 situé à la limite de la barrière de L'Ecole primaire « Sa Majesté » de Leboudi est un puits de coordonnées géographiques (latitude 3°54'55,55412''N, longitude 11°26'26,873888''E et altitude 798m). On note principalement une absence de couvercle, une activité agricole importante et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Puits P4**

P4 situé à la montée collège NELL de Leboudi est un puits de coordonnées géographiques latitude (3°54'53,003888''N, longitude 11°26'41,70012''E et altitude 772m). On note une présence de couvercle, une légère activité agricole et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la cuisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Source S2**

S2 située quartier maison de retraite est une source en zone marécageuse de coordonnées géographiques (latitude 3°54'18,55836''N, longitude 11°26'50,98056''E et altitude 709m). On note principalement une activité agricole importante et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la boisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

➤ **Puits 5**

P5 situé à la carrière de Leboudi est un puits de coordonnées géographiques (latitude 3°54'4,686''N, longitude 11°26'51,55188''E et altitude 743m). On note principalement une absence de couvercle, une légère activité agricole et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la lessive et la vaisselle (Figure 4).

➤ **Puits 6**

P6 situé à la descente carrière de Leboudi est un puits couvert de coordonnées géographiques latitude (3°54'8,74224''N, longitude 11°26'51,89676''E et altitude 736m). On note la présence d'une margelle, une légère activité agricole et quelques habitations aux alentours. L'eau est utilisée pour la lessive et la vaisselle (Figure 4).

➤ **Source S3**

S3 située à la descente carrière de Leboudi est une source en zone marécageuse de coordonnées géographiques (latitude 3°54'11,646''N, longitude 11°26'55,47588''E et altitude 719m). On note principalement une activité agricole importante et quelques habitations aux

alentours. L'eau est utilisée pour la boisson, la lessive, la vaisselle et l'arrosage des cultures (Figure 4).

Les coordonnées géographiques, la localisation et les différentes origines de pollution des puits et des sources sont présentées dans le tableau IV.

Tableau III : Synoptique des codes de dénominations, localisations, coordonnées géographiques, altitudes et source de pollutions ponctuelles des points d'échantillonnage étudiés

Stations	Code	Localisation	Latitude (N) Longitude (E)	Altitude (m)	Nature et sources de pollution
Forage 1	F1	Contrôle de police de Leboudi	3°56'59,784'' 11°27'28,338''	806	Végétation
Forage 2	F2	Zamengoe	3°56'46,248'' 11°27'17,826''	804	Forage à proximité de la route
Forage 3	F3	Lycée bilingue	3°56'43,2538'' 11°26'27,997''	804	Végétation , utilisation des engrais organiques
Forage 4	F4	Dépôt de bois	3°56'9,474'' 11°26'31,218''	806	Végétation
Forage 5	F5	Carrefour de Leboudi 1	3°55'54,126'' 11°26'40,139''	783	A proximité de la route
Forage 6	F6	Chefferie de Leboudi 1	3°55'23,058'' 11°26'37,691''	789	Activité agricole
Puits 1	P1	Ngoya 1	3°56'18,179'' 11°26'47,208''	793	Latrine en amont à proximité du puits.
Puits 2	P2	Centre de Santé H	3°55'20,430'' 11°26'49,818''	793	Végétations, habitations
Puits 3	P3	Ecole primaire «Sa Majesté»	3°54'55,554'' 11°26'26,8738''	798	Végétations, puit non protégé
Puits 4	P4	Montée collège Nell	3°54'53,00388'' 11°26'41,70012''	772	Habitations, à proximité de la route
Puits 5	P5	Carrière	3°54'4,686'' 11°26'51,551''	743	Latrine en proximité, puit non protégé
Puits 6	P6	Descente carrière	3°54'8,7422'' 11°26'51,896''	736	Végétations, habitations
Source 1	S1	Mebongo	3°54'54,68412'' 11°26'24,4438'	794	Situé au milieu d'une végétation
Source 2	S2	Maison de retraite	3°54'18,55836'' 11°26'50,9805''	709	Marécage, plantation avec utilisation des engrais organiques
Source 3	S3	Poste de police	3°54'11,646'' 11°26'55,475''	719	Végétations, latrine

La figure 4 ci-dessous présente les images des différents points d'eau souterraine étudiés.



Figure 4 : Photographie des points d'eau souterraine étudiés (F= forage, P= puits et S= source)
(photo Gueguim, octobre 2024).

II-2- Matériel et méthodes

II-2-1- Matériel

II-2-1-1-Période d'étude

L'étude a été menée dans la localité de Leboudi en 02 phases. La première phase qualifiée de préliminaire allant de décembre 2023 à janvier 2024. Elle a consisté à une visite d'observation et de repérage des points d'eau. La seconde phase s'est déroulée de mai à octobre 2024 a consisté à l'échantillonnage des eaux à une fréquence mensuelle pour les analyses physicochimiques et bactériologiques qui ont été réalisées dans le laboratoire d'Hydrobiologie et Environnement de l'Université de Yaoundé I.

II-2-1-2- Collecte des échantillons d'eaux souterraines

L'échantillonnage des eaux souterraines a été réalisé d'après les techniques préconisées par APHA (2009) et Rodier (2009). Concernant les puits, la collecte des échantillons a été faite à l'aide d'un seau stérile et d'une corde de longueur adaptée à la profondeur des puits. Pour les forages, la collecte a été faite au niveau des pompes à motricité manuelle en laissant l'eau couler pendant quelques minutes pour éliminer l'eau stagnante et l'échantillon été recueilli directement à la sortie du tuyau d'arrivée d'eau. S'agissant des sources, la collecte a été faite directement à la sortie du tuyau d'arrivée d'eau. Les échantillons destinés aux analyses microbiologiques ont été prélevés dans des flacons en verre stériles de 500 mL. Ceux destinés aux analyses physicochimiques ont été collectés dans des flacons en polyéthylène à double bouchage de 250 mL et 1000 mL, puis transportés dans une enceinte réfrigérée jusqu'au laboratoire, où les analyses ont été immédiatement effectuées (Rodier *et al.*, 2016). Les paramètres physicochimiques considérés dans cette étude ont été mesurés sur le terrain et au laboratoire suivant les techniques préconisées par (Rodier *et al.*, 2016). Les paramètres morphométriques ont également été considérés.

II-2-1-3- Matériel biologique

Les groupes de bactéries considérées dans l'étude ont été les BHAM et les bactéries témoins de contaminations fécales. Les BHAM ont été choisies afin d'estimer la flore totale revivifiable dans chaque point d'eau échantillonné. Les coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux ont été choisis afin d'analyser une contamination des eaux récentes (coliformes totaux et coliformes fécaux) et qui perdurent dans le temps (streptocoques fécaux) (Rodier *et al.*, 2009). Parmi les bactéries du groupe coliformes fécaux, la bactérie *Escherichia coli* a été recensé pour témoigner de la présence concomitante des germes potentiellement pathogènes dans les eaux souterraines de Leboudi (Baleng *et al.*, 2022b, Noah Ewoti *et al.*, 2021a).

II-2-2- Méthode

II-2-2-1- Isolement et dénombrement des microorganismes dans les points d'eau

Plus qu'il s'agit d'une étude pionnière de la localité, seule les germes témoins de contamination fécale ont été considérés (OMS, 2004). Une fois les colonies ainsi dénombrées les résultats sont reportés au volume de l'échantillon et les densités bactériennes sont exprimées en Unités Formant Colonies par 100 millilitres (UFC/100 mL) (Rodier *et al.*, 2009). Dans ce travail, pour éviter les défauts de variation lors de l'élaboration des histogrammes montrant la dynamique d'abondance des microorganismes, les densités ont été transformées en Log (UFC/100 mL). (Noah Ewoti *et al.*, 2010).

II-2-2-2- Isolement et dénombrement des bactéries hétérotrophes aérobies mésophiles (BHAM)

Les BHAM ont été isolées afin d'avoir une idée de la flore totale bactérien (Holt *et al.*, 2000). Elles ont été isolées par la technique d'étalement à la surface de la gélose ordinaire coulée dans des boîtes de Pétri. En effet un volume de 100 μ L (0.1 mL) de ces échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide d'une pipette teneur stérile puis déposés à la surface de la gélose ordinaire (Bugno *et al.*, 2010). Les échantillons ont été par la suite étalés à l'aide d'un étaleur en verre en condition stérile dans le diamètre de stérilité défini par la flamme du bec bunsen (Marchal *et al.*, 1991). L'étalement a été suivi d'une observation de ces boîtes de Pétri à température ambiante pendant une durée allant de 1 à 5 jours. Les colonies aux caractères cultureux multiples et variés ont été dénombrées par la méthode de comptage direct (Holt *et al.*, 2000) et les résultats ont été exprimés Log (UFC/100 mL).

II-2-2-3- Isolement et dénombrement des coliformes totaux, coliformes fécaux

L'isolement des coliformes totaux, fécaux a été effectué sur le milieu de culture spécifique ENDO par les techniques de filtration. Pour cela, un volume de 100 mL de ces échantillons (non dilué) a été filtré à travers une membrane filtrante stérile, de porosité 0,45 μ m à l'aide d'un dispositif de filtration sous vide de marque Sartorius GmbH modèle SM 168 26. Par la suite, la membrane a été déposée à la surface de la gélose ENDO coulée dans des boîtes de Pétri stériles de 55mm (APHA, 2009). Le travail s'est fait dans le diamètre de stérilité défini par la flamme du bec bunsen. L'ensemble des boîtes de Pétri a été incubé pendant 24 heures à 37°C pour les coliformes totaux et pendant 48 heures à 44°C pour les coliformes fécaux pour une croissance préférentielle de ces germes. Parmi les coliformes fécaux, les colonies ayant présenté l'aspect métallique présomptive de *E. coli* ont été dénombrées. Avant le dénombrement, les colonies subissent une étude macroscopique qui consiste à vérifier les caractères cultureux (formes, aspect, couleur, contour). Seuls les colonies aux caractères cultureux satisfaisants ont été dénombrées par la technique de comptage directe (Holt *et al.*, 2000). Il s'agit des colonies donc

les caractères cultureux sont roses, de petite taille, rondes et lisses à bords réguliers pour les coliformes totaux et des colonies rouges et éclats métalliques, rondes et lisses pour les coliformes fécaux. (Diagnostic Pasteur, 1987).

II-2-2-4- Isolement et dénombrement des streptocoques fécaux

L'isolement des streptocoques fécaux a été effectué sur le milieu BEA (Bile Esculine Azide) qui est un milieu sélectif utilisé pour dénombrer des streptocoques fécaux dans de l'eau. Pour cela, un volume de 100 mL de ces échantillons (non dilué) a été filtrés à travers une membrane filtrante stérile, de porosité 0,45 μm à l'aide d'un dispositif de filtration sous vide stérile de marque Sartorius GmbH modèle SM 168 26. Par la suite, la membrane a été déposée à la surface de la gélose BEA coulée dans des boîtes de Pétri stériles de 55mm (APHA, 2009). Le travail s'est fait dans le diamètre de stérilité défini par la flamme du bec bunsen. L'ensemble des boîtes de Pétri a été incubé pendant 24 heures à 37°C pour une croissance préférentielle de ces germes. Avant le dénombrement, les colonies subissent une étude macroscopique qui consiste à vérifier les caractères cultureux (formes, aspect, couleur, contour). Le dénombrement a été effectué par la technique de comptage directe. Seuls les colonies aux caractères cultureux satisfaisants ont été dénombrées par la technique de comptage directe (Holt *et al.*, 2000).

II-2-3- Détermination de l'origine probable de la contamination des eaux

Le rapport entre les densités de coliformes fécaux (CF) et de streptocoques fécaux (SF) a permis de déterminer l'origine probable de la pollution (OMS, 2004). En effet, lorsque $\text{CF/SF} \geq 4$ la pollution est probablement d'origine humaine, $2 \leq \text{CF/SF} < 4$ la pollution est dite à prédominance humaine dans une population mixte, $1 < \text{CF/SF} < 2$ la pollution est probablement liée à une population mixte, $0,7 < \text{CF/SF} < 1$ la pollution de l'eau est principalement animale dans une population mixte et lorsque $\text{CF/SF} \leq 0,7$ la pollution est d'origine animale (WHO, 2022 ; Noah Ewoti *et al.*, 2021a).

II-2-4- Evaluation des paramètres morphométriques et physicochimiques des points d'échantillonnage susceptible d'influencer la dynamique d'abondance des indicateurs de la pollution fécale

II-2-4-1- Mesure des paramètres morphométriques

II-2-4-1-1- Hauteur de la colonne d'eau

La hauteur de la colonne d'eau qui représente l'espace occupé par l'eau dans le puits et a été mesurée à l'aide d'une corde graduée lestée, les résultats ont été exprimés en mètre (m). (Rodier *et al.*, 2009).

II-2-4-1-2- Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique qui représente l'espace entre la surface de l'eau du puits et la base de la margelle a également été évalué à l'aide d'une corde graduée lestée (Rodier *et al.*, 2009). Les résultats ont été exprimés en mètre (m).

II-2-4-1-3- Hauteur de la margelle

La hauteur de la margelle correspond généralement à la distance verticale entre le rebord de la margelle et la surface du sol ou le niveau de référence. Elle a été évaluée à l'aide d'un décimètre, les résultats ont été exprimés en mètre (m) (Rodier *et al.*, 2009).

II-2-4-2- Mesure des paramètres physicochimiques

Les paramètres physicochimiques considérés pour cette étude sont principalement analysés par volumétrie et par spectrophotométrie, selon les recommandations préconisées par Rodier *et al.* (2009) et APHA (2009).

II-2-4-2-1 Paramètres physiques

II-2-4-2-1-1- Température

La température de l'eau a été mesurée « *in situ* » à l'aide d'un multi-paramètre de marque HANNA/991001. Ses électrodes ont été introduit verticalement au 1/3 de la colonne d'échantillon. Après 1 à 2 minutes, le chiffre correspondant sur le cadran de l'écran a été relevé et les résultats ont été exprimés en degré Celsius (°C).

II-2-4-2-1-2- Matières en suspensions (MES)

Les teneurs en MES ont été mesurés au laboratoire. 10 mL d'eau d'échantillon est introduit dans une cellule spectro. Cette cellule est ensuite introduite dans un puits de lecture du spectrophotomètre préalablement calibré à l'eau distillée (lecture à 0). La lecture s'est faite à la longueur d'onde 810 nm. Les valeurs ont été exprimées en mg/L.

II-2-4-2-1-3- Couleur

La couleur a été mesurée au laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre HACH/DR 3900. 10 mL d'eau d'échantillon est introduit dans une cellule spectro. Cette cellule est ensuite introduite dans un spectrophotomètre préalablement calibré à l'eau distillée (lecture à 0). La lecture s'est faite à la longueur d'onde 455 nm et les valeurs obtenues ont été exprimées en Platinium Cobalt (Pt.Co).

II-2-4-2-1-4- Solides totaux dissous (TDS)

Les teneurs des eaux en TDS ont été mesurées « *in situ* » à l'aide d'un multi-paramètre portatif de marque HANNA/991001 l'électrode a été plongée dans l'échantillon. Les résultats ont été exprimés en mg/L.

II-2-4-2-2 Paramètres chimiques

II-2-4-2-2-1- Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH a été mesuré « *in situ* » à l'aide d'un multiparamètre de marque HANNA/991001. En effet, l'électrode de l'appareil a été introduite dans l'échantillon recueilli dans le flacon au 1/3 durant 2 à 3 minutes. Après lecture des valeurs, le résultat a été exprimé en unité conventionnelle (UC).

II-2-4-2-2-2- Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique a été évaluée sur le terrain à l'aide d'un multiparamètre portatif de marque HANNA/991001. Le protocole utilisé est le même que celui de la mesure du pH. Les valeurs ont été exprimées en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

II-2-4-2-2-3- CO₂ dissous

La mesure de la teneur en CO₂ dissous s'est faite en deux étapes. Sur le terrain, il est préparé une solution en introduisant 20 mL d'hydroxyde de sodium (NaOH) N/20 dans une fiole de 200 mL, puis en ajoutant 2 à 3 gouttes de phénolphthaléine, un indicateur coloré. La solution est complétée avec de l'échantillon d'eau jusqu'au trait de jauge de 200 mL. La solution rose obtenue a été transvasée dans un flacon en polyéthylène de 250 mL et transportée au laboratoire. Au laboratoire, 50 mL de ces solutions ont été titrés avec de l'acide chlorhydrique (HCl) N/10 jusqu'à ce que la solution devienne incolore. La teneur en CO₂, exprimée en mg/L, a ensuite été déterminée avec la formule suivante :

$$[\text{CO}_2] \text{ (mg/L)} = (\text{descente burette du témoin} - \text{descente burette de l'échantillon}) \times 17,6.$$

II-2-4-2-2-4- Oxygène dissous (OD)

L'oxygène dissous a été déterminé au laboratoire à l'aide d'un oxymètre de marque DO9001 et les valeurs ont été exprimées en mg/L.

II-2-4-2-2-5- Nitrates

Les nitrates ont été mesurés par colorimétrie au moyen d'un spectrophotomètre DR/39000 de marque HACH, en utilisant une gélule de NitraVer HR comme réactif introduit dans 10 mL d'échantillon contenu dans une cellule spectrophotométrique. L'ensemble a été agité durant 1 minute puis laissé au repos pendant environ 2 minutes. Cette cellule est ensuite introduite dans un spectrophotomètre préalablement calibré à l'eau distillée (lecture à 0). La lecture de la teneur en nitrates a été effectuée à la longueur d'onde 500 nm et les résultats ont été exprimés en mg/L de NO₃.

II-2-4-2-2-6- Orthophosphates (PO₄³⁻)

Les teneurs en orthophosphates ont été mesurées par colorimétrie en utilisant comme réactif le phosver RTG. Cette cellule est ensuite introduite dans un spectrophotomètre préalablement calibré à l'eau distillée (lecture à 0). La lecture s'est faite au spectrophotomètre DR/39000 de marque HACH à la longueur d'onde 420 nm et les résultats ont été exprimés en mg/L de PO₄³⁻.

II-2-4-2-2-7- Azote ammoniacal

Les teneurs en azote ammoniacal ont été mesurées par colorimétrie suivant la méthode de Nessler qui utilise le sel de Rochelle et le réactif de Nessler. Cette cellule est ensuite introduite dans un spectrophotomètre préalablement calibré à l'eau distillée (lecture à 0). La lecture de la teneur en azote ammoniacal se fait au spectrophotomètre DR/3900 de marque HACH à la longueur d'onde 425 nm et les résultats ont été exprimés en mg/L de NH₄⁺.

II-2-5- Evaluation de l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des espèces bactériennes isolées

II-2-5-1- Test de corrélation de rang « r » de Spearman

Les corrélations de rang de Spearman ont permis d'évaluer le degré de liaison entre les paramètres physicochimiques d'une part et d'autre part entre les paramètres physicochimiques et microbiologiques. Cette corrélation est notée « r » et deux variables sont plus ou moins fortement liées. Les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS 20.0.

II-2-5-2- Test de comparaison des moyennes

Les comparaisons entre les variables considérées ont été effectuées grâce aux tests H de comparaison de Kruskal-Wallis et U de Mann-Whitney. Il a ainsi permis de déterminer si un paramètre varie de façon significative d'une station à l'autre ou d'un mois à un autre. Les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel SPSS version 20.0 et les résultats appréciés au seuil de sécurité de 5 %.

II-2-5-3- Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'Analyse en Composantes Principales a été effectuée à partir du logiciel XL STAT 2021 afin de caractériser les stations d'échantillonnage sur la base des densités bactériennes en relation avec les paramètres abiotiques. En outre, elle a permis d'une part de mettre en évidence les relations de dépendance entre les différents paramètres mesurés et d'autre part, de déterminer les variables qui caractérisent chaque station (Tamsa Arfao *et al.*, 2021a).

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

III-1- Résultats

III-1-1- Qualité microbiologique des eaux échantillonnées

III-1-1-1- Aspect qualificatif

Après étalement des échantillons d'eau et incubation des boîtes de Pétri, l'examen macroscopique des colonies bactériennes a révélé des colonies aux caractères culturaux variés:

- Sur milieu gélose standard, les colonies bactériennes ont présenté une diversité de tailles, de couleurs, formes et d'aspects. Il s'agit principalement de bactéries hétérotrophes aérobies mésophiles (BHAM) (figure 5 A).
- Des colonies rouges et éclats métalliques, rondes, lisses, à contours réguliers, présomptives aux coliformes fécaux (*Escherichia coli*) ont été observées sur gélose Endo, incubée à 44°C (figure 5 B).
- Des colonies roses, de petites tailles, rondes et lisses à contours réguliers, présomptives aux coliformes totaux ont été observées sur gélose Endo incubée à 37°C (figures 5 C).
- L'examen macroscopique des colonies isolées sur le milieu gélose BEA a révélé de petites colonies translucides avec un halo noir, présomptives des streptocoques fécaux (figure 5 D).

La figure 5 présente les différents types de cultures bactériennes sur les différents milieux de culture considérés.

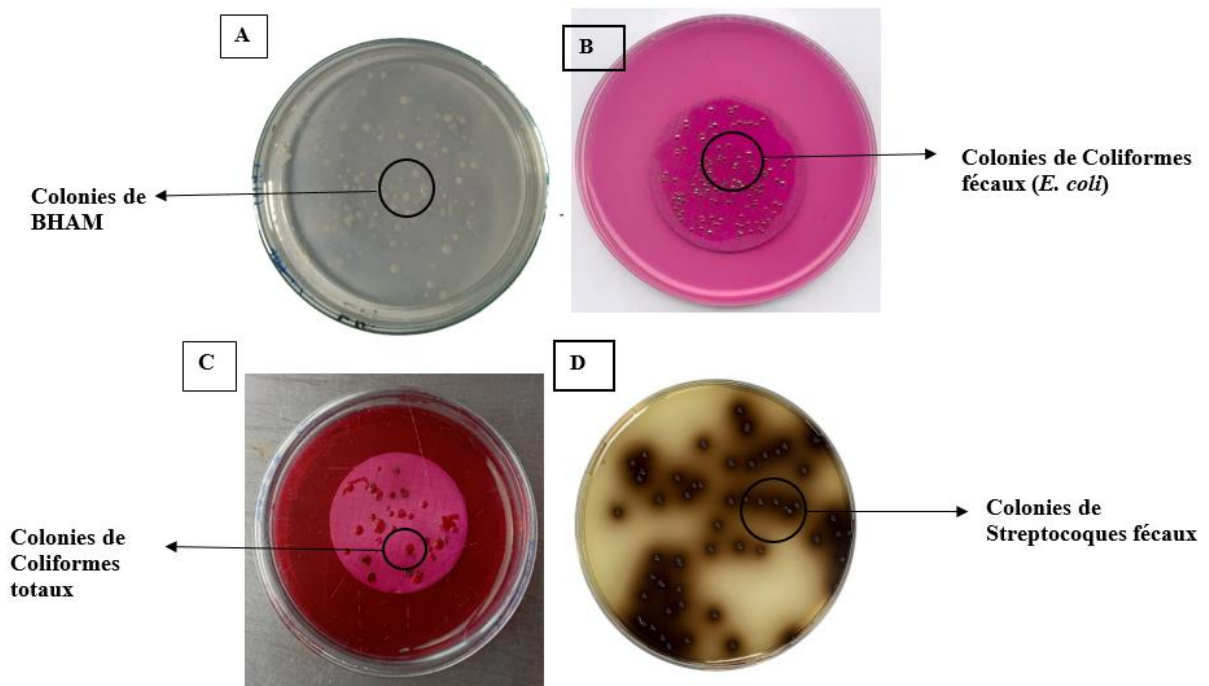


Figure 5 : Photographie des colonies bactériennes observées A : BHAM ; B : coliformes fécaux (*E. coli*) ; C : coliformes totaux ; D : Streptocoques fécaux (photo Gueguim, 2024)

III-1-1-2- Dynamique d'abondance des germes étudiés

III-1-1-2-1- Abondance relative et absolue des bactéries isolées

➤ Variation des abondances relatives des microorganismes

Au cours de la période d'étude, les densités bactériennes ont été isolées et réparties en quatre groupes. Dans les puits, les forages et les sources, les groupes bactériens les plus représentés sont les coliformes fécaux suivi des coliformes totaux, streptocoques fécaux et BHAM (figure 6).

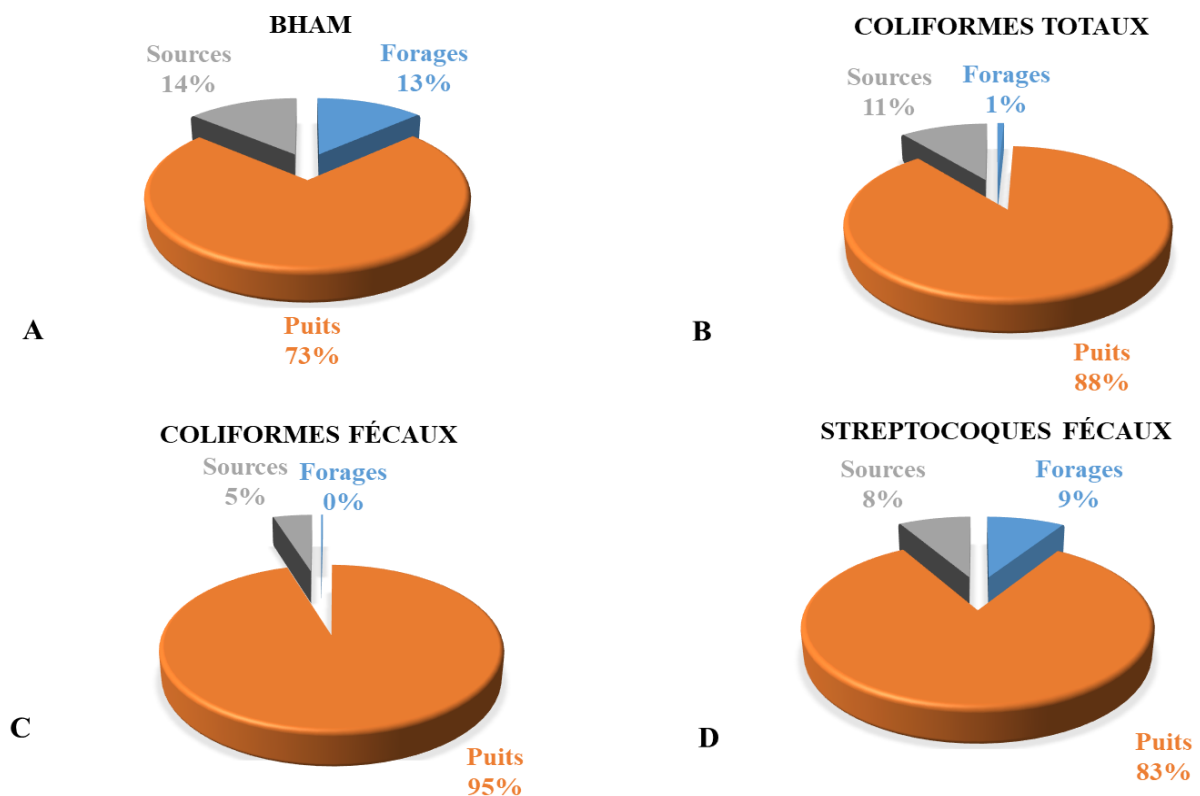


Figure 6: Répartition quantitative des abondances relatives des groupes bactériens isolés pendant notre période d'étude A : BHAM ; B : Coliformes totaux et C : Coliformes fécaux

➤ Variations spatiales des abondances absolues des microorganismes considérés

Sur le plan spatial, la densité des BHAM isolées a été plus élevée au point S1 avec une abondance de 41 (Log (UFC/100 mL)). La plus petite abondance 24 (Log (UFC/100 mL)) a été relevée au point S2 (figure 7A). La densité maximale des coliformes totaux 28 (Log (UFC/100 mL)) a été enregistrée à la station P3 et la plus faible 11 (Log (UFC/100 mL)) au point F6 (figure 7B). Les abondances absolues des coliformes fécaux ont atteint une valeur maximale de 30 (Log (UFC/100 mL)) à la station P3 et la plus petite valeur 3 (Log (UFC/100 mL)) a été observée au point F1 (figure 7C). Les streptocoques fécaux ont été plus abondants au point P1

9 (Log (UFC/100 mL)) et la plus faible abondance 2 (Log (UFC/100 mL)) a été observée au point F1 (figure 7D).

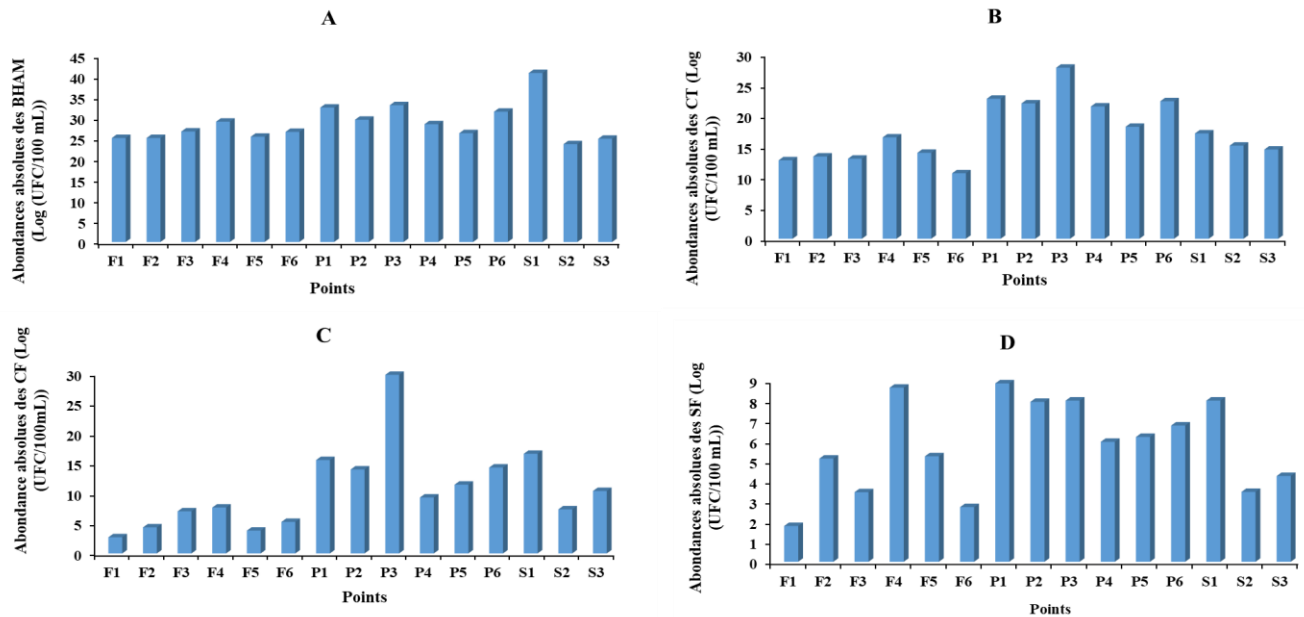


Figure 7 : Variation spatiale des abondances absolues des colonies de (A) : BHAM ; (B) : coliformes totaux ; (C) : coliformes fécaux et (D) : streptocoques fécaux isolées pendant la période d'étude dans les eaux isolées

➤ Variation temporelle des abondances absolues des microorganismes

Sur le plan temporel, on observe que les colonies isolées étaient moins abondantes au mois de juillet pour tous les groupes étudiés, tandis que mai et août semblent correspondre aux périodes de plus forte présence. Cela pourrait refléter des variations saisonnières ou des influences environnementales particulières.

L'abondance absolue des BHAM varie entre environ 60 et 75 (Log (UFC/100 mL)). Le pic d'abondance est observé en août, tandis que le niveau le plus bas se situe en juillet. L'abondance des Coliformes totaux fluctue entre environ 30 et 50 (Log (UFC/100 mL)). Le mois de mai affiche la plus forte abondance, tandis que juillet est le mois le moins abondant. L'abondance des Coliformes fécaux oscille entre environ 10 et 40 (Log (UFC/100 MI)). Le mois de Mai présente la plus grande abondance, alors que le mois de juillet marque la plus faible abondance. L'abondance des Streptocoques fécaux est comprise entre environ 5 et 30 (Log (UFC/100 mL)). Le mois de Mai se distingue avec la plus forte abondance, tandis que le mois de juillet présente la plus faible abondance.

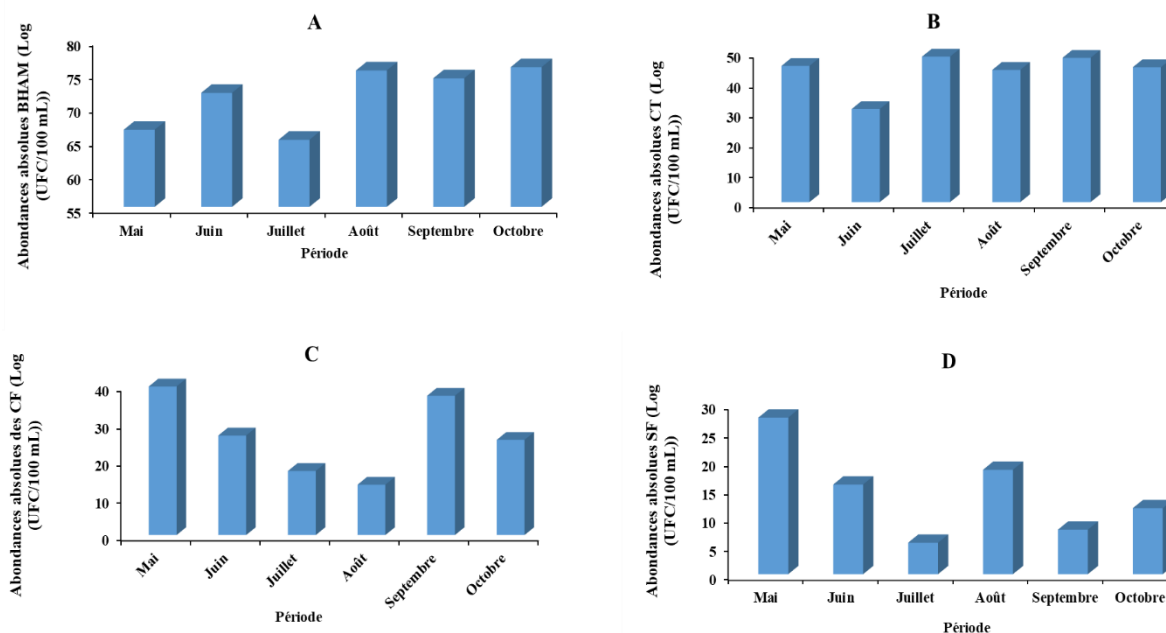


Figure 8 : Variation temporelle des abondances absolues des colonies isolées (A): BHAM ; (B) : coliformes totaux ; (C) : coliformes fécaux ; (D) : streptocoques fécaux.

III-1-1-2-2- Variations spatio-temporelles des abondances bactériennes dans les stations d'échantillonnage

Dans l'ensemble, l'abondance des bactéries isolées a varié d'une station à l'autre et d'une période d'échantillonnage à l'autre.

En général, les bactéries hétérotrophes aérobies mésophiles (BHAM) ont été présentes dans toutes les stations et dominent largement la communauté bactérienne identifiée. L'abondance maximale des BHAM 7,07 (Log (UFC/100 MI)) d'eau, a été enregistrée à la station S1 au mois de juin, tandis que l'abondance minimale, 3 (Log (UFC/100 mL)) d'eau, a été relevée aux stations F5 et S2 aux mois de mai et juillet respectivement, avec une moyenne de $4,77 \pm 0,85$ (Log UFC/100 mL)) d'eau (figure 9A).

Les densités des coliformes totaux ont fluctué entre 0 et 5,76 (Log (UFC/100 mL)). La densité la plus élevée, 5,76 (Log (UFC/100 mL)) d'eau, a été enregistrée à la station P3 au mois de juin. Cependant, les colonies de coliformes totaux ont parfois été rare dans deux stations à savoir P5 au mois d'octobre et S3 au mois d'août (figure 9B). Une moyenne de $2,91 \pm 1,31$ (Log (UFC/100 mL)) d'eau a été enregistrée.

L'abondance des coliformes fécaux a atteint 5,17 (Log (UFC/100 mL)) d'eau cette abondance a été observée à la station P3 au mois de septembre durant la période d'étude.

L'abondance minimale 0 (Log (UFC/100 mL)) d'eau a été relevée dans la majorité des stations de prélèvement à différents mois ; avec une moyenne de $1,37 \pm 0,32$ (Log (UFC/100 mL)) (figure 9C).

La densité de *Escherichia coli* a atteint 5,07 (Log (UFC/100 mL)) d'eau à la station P3 au mois de mai durant toute la période d'étude. La densité minimale 0 (Log (UFC/100 mL)) d'eau a été relevée dans plusieurs stations, à savoir F1 aux mois de mai à octobre ; P1, F4 et P6 au mois de mai ; F2, F3, F5, F6, P2 et P4 aux mois de juin à octobre F4, P3 et S2 au mois de juin ; F4, S1 et S2 au mois de juillet ; P5 aux mois de juillet à octobre ; S1 et S3 au mois d'août ; P6 en septembre ; P3 et S2 aux mois de septembre et octobre avec une moyenne de $0,40 \pm 0,19$ (Log (UFC/100mL)) d'eau (figure 9D).

Les concentrations des streptocoques fécaux, elles ont oscillé entre 0 et 3,91 (Log (UFC/100 mL)). L'abondance la plus élevée 3,91 (Log (UFC/100 mL)) d'eau a été enregistrée à la station P5 au mois d'août, tandis que l'abondance la plus basse 0 (Log (UFC/100 mL)) d'eau a été relevée aux stations F1 aux mois de mai, juin, juillet et septembre ; F2 aux mois de juillet et septembre ; F3 en juillet et octobre ; P1 aux mois d'août et septembre ; F4 au mois de juillet ; F5 aux mois de juillet, septembre et octobre ; F6 aux mois de juin, juillet et août ; P2 aux mois de juillet, août et octobre ; P4 aux mois de juillet, août et octobre ; S2 aux mois de juin, juillet et septembre ; P5 aux mois de juin, juillet, septembre et octobre ; P6 aux mois de juillet, août et septembre ; et également au mois de mai à la station S2 (figure 9E) avec une moyenne de $0,97 \pm 0,10$ (Log (UFC/100 mL)) d'eau.

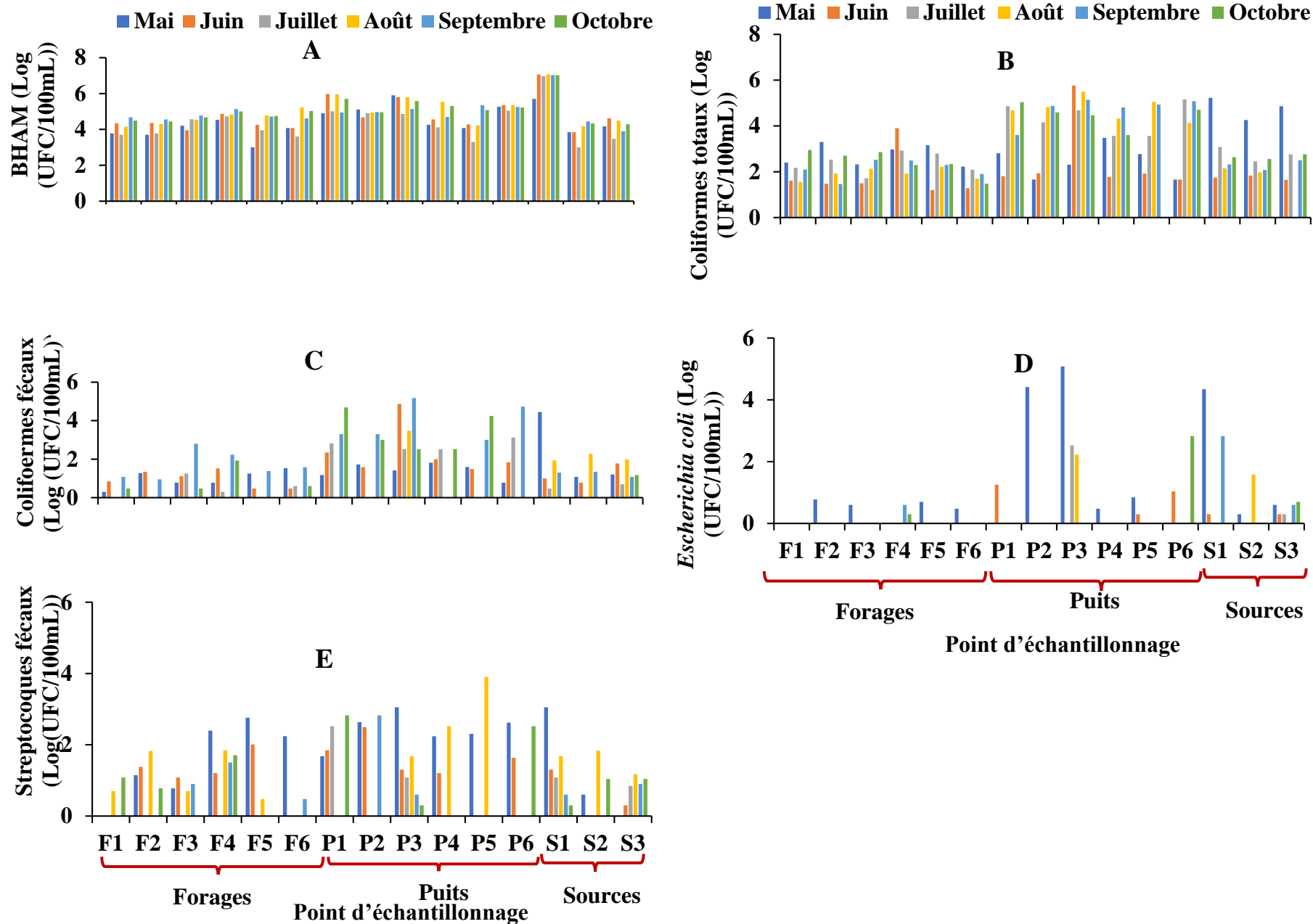


Figure 9 : Variations spatio-temporelles des densités des bactéries isolées dans les eaux souterraines pendant la période d'étude (A) : BHAM ; (B) : Coliformes totaux ; (C) : Coliformes fécaux ; (D) : *E. coli* et (E) : Streptocoques fécaux

III-1-1-2-3- Détermination de l'origine probable de la pollution

La relation entre les densités des valeurs moyennes des coliformes fécaux (CF) et celles des streptocoques fécaux (SF) a permis de déterminer l'origine probable de la pollution. (OMS, 2004) (tableau V). L'origine de la pollution observée dans les différentes stations est multiple et liée aux diverses sources de contamination présentes dans l'environnement.

En ce qui concerne les eaux de forage, la contamination observée est majoritairement d'origine animale dans la majorité des cas, incluant des infiltrations d'eaux usées domestiques et des eaux de ruissellement des zones agricoles.

En ce qui concerne les eaux de puits et de sources, dans l'ensemble la pollution est probablement d'origine humaine. Ce résultat s'explique par des rejets d'eaux usées, à l'utilisation des engrais organiques, ou à des latrines proches.

Tableau IV: Rapports coliformes fécaux sur streptocoques fécaux par points d'échantillonnage

Type d'échantillon	Stations	Rapport CF/SF	Origine de la pollution
Forages	Forage 1	1,20	
	Forage 2	0,45	
	Forage 3	21,92	
	Forage 4	0,57	
	Forage 5	0,06	
	Forage 6	0,46	
Puits	Puits 1	45,82	
	Puits 2	2,19	
	Puits 3	7,80	
	Puits 4	1,59	
	Puits 5	2,28	
	Puits 6	68,95	
Sources	Source 1	23,17	
	Source 2	2,78	
	Source 3	4,68	

Pollution d'origine animale ou dans une population dans une population
 La pollution d'origine humaine ou dans une population
 La pollution est probablement lié à une population mixte

III-1-2 Présentation des paramètres morphométriques et physicochimiques

III-1-2-1- Paramètres morphométriques

La hauteur des puits et la hauteur des margelles ont variés d'un puits à un autre. Les résultats sont consignés dans le tableau VI.

Les valeurs des hauteurs de la margelle ont fluctué entre 0,9 et 1,3 m. La valeur la plus élevée a été enregistrée à la station P6 et la valeur la plus faible a été obtenue à la station P2 (tableau VI).

Tableau V : Paramètres morphométriques des stations d'échantillonnage pendant la période d'étude.

Stations	Paramètres morphométriques	
	Hauteur des puits (m)	Hauteur de la margelle (m)
P1	14,5	1,2
P2	18,7	0,9
P3	20,3	1,2
P4	15,8	1,3
P5	10,4	0,9
P6	16,2	1,3

Dans l'ensemble, la hauteur de la colonne d'eau dans les puits a varié de 0,9 à 3,5 m. La plus petite valeur a été observée à la station P3 au mois de Mai et la valeur la plus élevée a été obtenue à la station P2 au mois de Juillet. Les valeurs des niveaux piézométriques ont fluctué entre 19,4 et 8,6 m. la valeur la plus élevée a été enregistrée à la station P3 au mois de Mai et la plus faible valeur a été obtenue à la station P5 au mois d'Août (Figure 10).

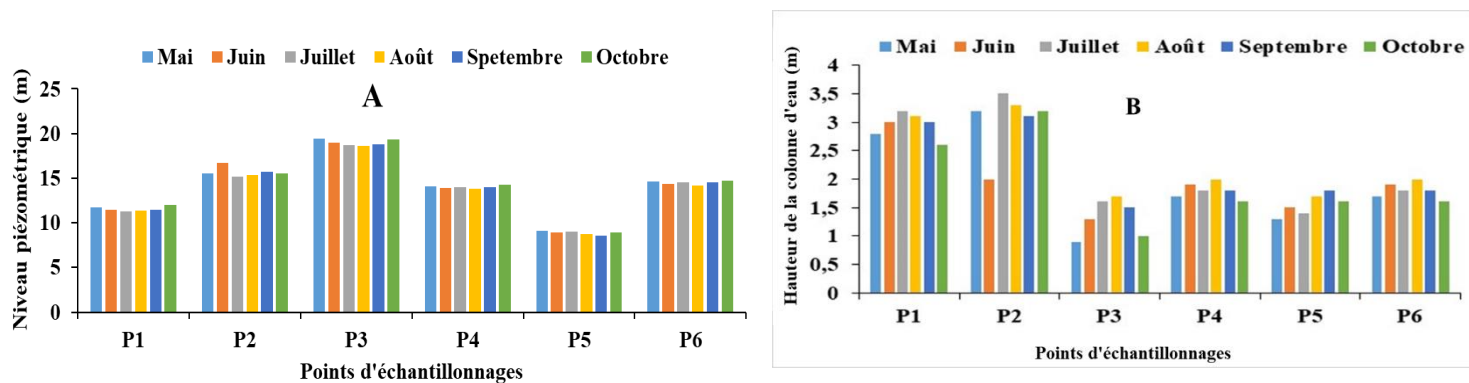


Figure 10: Variations spatio-temporelles du niveau piézométrique (A) et de la hauteur de la colonne (B) d'eau mesurées dans les puits pendant la période de l'étude.

III-1-2-2- Présentation de la qualité physicochimique des eaux souterraines

III-1-2-2-1- Paramètres physiques

Les paramètres physiques considérés au cours de cette étude ont présenté des variations spatio-temporelles dans l'ensemble.

Tout au long de l'étude, la température de l'eau a varié de 22,4 à 29,5°C avec une moyenne de $25,65 \pm 0,45^\circ\text{C}$. La valeur maximale a été enregistrée à la station P3 au mois de mai, tandis que la valeur minimale a été observée à la station S2 au mois d'octobre (figure 11A).

En ce qui concerne les teneurs en matières en suspension (MES), elles ont fluctué de 0 à 103 mg/L avec une moyenne de $4,83 \pm 9,65$ mg/L. La valeur maximale a été relevée à la station P3 en août, et la valeur minimale a été enregistrée dans plusieurs stations aux mois de mai, juillet et août (figure 11 B).

Quant à la turbidité, elle a varié tout au long de l'étude entre 0 et 36 FTU, avec une moyenne de $5,6 \pm 3,42$ FTU. La valeur maximale a été observée en mai à la station P3, tandis que la valeur minimale a été relevée au mois de mai dans les stations F1, F2, F5, P4 et P5 ; en juillet dans toutes les stations sauf F2 à F5; en août dans les stations F2, F3, F4 et P5 ; et enfin au mois de septembre dans les stations F2 et F4 (figure 11 C).

Pour ce qui est des solides totaux dissous (TDS) enregistrés pendant la période d'étude, ils ont varié de 9 à 261 ppm avec une moyenne de $56,53 \pm 18,53$ ppm. La valeur maximale a été relevée à la station P6 au mois de juillet, tandis que la valeur minimale a été observée à la station P5 au mois de septembre (figure 11 D).

Concernant les valeurs de la couleur de l'eau, elles ont oscillé entre 0 et 76 Pt.Co avec une moyenne de $13,8 \pm 4,76$ Pt.Co. La valeur maximale a été enregistrée en septembre à la station P3, tandis que la valeur minimale a été relevée dans presque toutes les stations aux mois de mai, juin et juillet (figure 11 E).

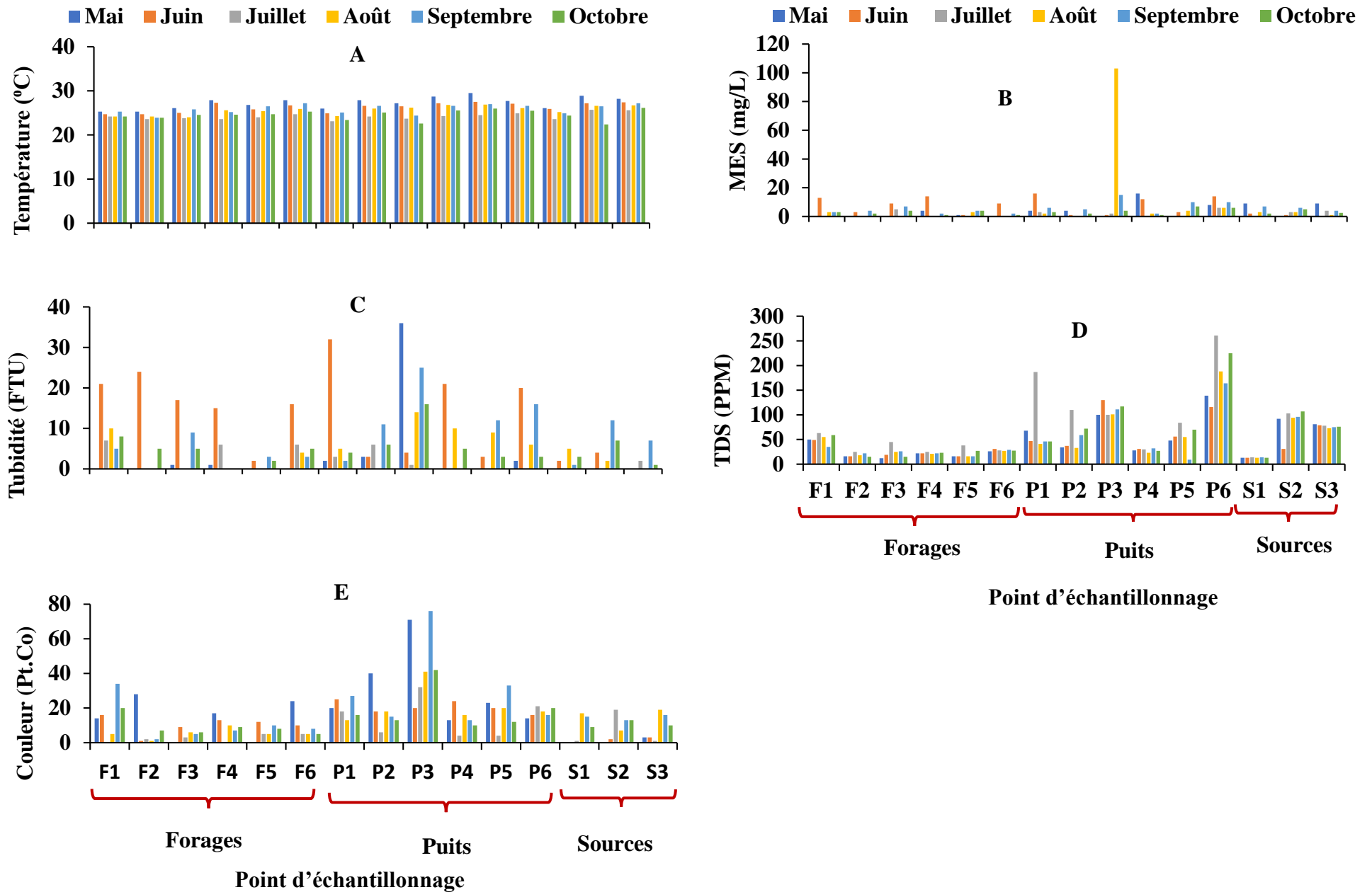


Figure 11: Variation des paramètres physiques mesurés pendant la période d'étude en fonction des stations (A) : Température ; (B) : MES ; (C) : Turbidité ; (D) : TDS ; (E) : Couleur.

III-1-2-2-2 Paramètres chimiques

Tout au long de l'étude, les valeurs de pH ont varié de 5,43 à 7,9 UC avec une moyenne de $6,91 \pm 0,19$ UC. La valeur maximale a été relevée à la station S2 en septembre, tandis que la valeur minimale a été enregistrée à la station F6 au mois de mai (figure 12 A).

En ce qui concerne la conductivité, elle a fluctué de 4 à 375 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de $108,6 \pm 34,1$ $\mu\text{S}/\text{cm}$. La valeur maximale a été observée à la station P6 en août, et la valeur minimale a été relevée à la station P1 en juin (figure 12 B).

Pour le CO_2 dissous, les valeurs ont varié de 0 à 91,52 mg/L, avec une moyenne de $4,84 \pm 1,8$ mg/L. La valeur maximale a été enregistrée à la station P5 en mai, tandis que la valeur minimale a été relevée en juillet aux stations F1 et F4 (figure 12 C).

Les teneurs en oxygène dissous ont fluctué entre 5,1 et 7,82 mg/L, avec une moyenne de $6,18 \pm 0,16$ mg/L. La valeur maximale a été observée à la station F4 en septembre, et la valeur minimale a été relevée en juillet à la station S2 (figure 12 D).

Quant aux orthophosphates (PO_4^{3-}), les valeurs ont varié de 0 à 3,94 mg/L, avec une moyenne de $0,71 \pm 0,5$ mg/L. La valeur maximale a été atteinte à la station P1 au mois de Juillet et les valeurs minimales ont été enregistrées dans plusieurs stations au mois de Juillet, Août, Septembre, Octobre (figure 12 E).

Les teneurs en nitrates (NO_3^-) ont varié de 0 à 7,1 mg/L, avec une moyenne de $1,02 \pm 0,5$ mg/L. La valeur la plus élevée a été enregistrée au mois de Juillet à la station « P6 » et la plus faible a été enregistrée à la fois dans les stations F2 et F3 au mois d'Août (figure 12 F).

Enfin, les teneurs en azote ammoniacal (NH_4^+) ont oscillé entre 0 et 3,82 mg/L, avec une moyenne de $0,24 \pm 0,19$ mg/L. La valeur la plus élevée a été observée à la station P6 en septembre, tandis que la valeur la plus faible a été relevée en mai à la station F3 ; en juin aux stations F3, F4, F5, P2 et S1 ; en août aux stations F1, F4 et F5 ; et en septembre aux stations F2 et F4 (figure 12 G).

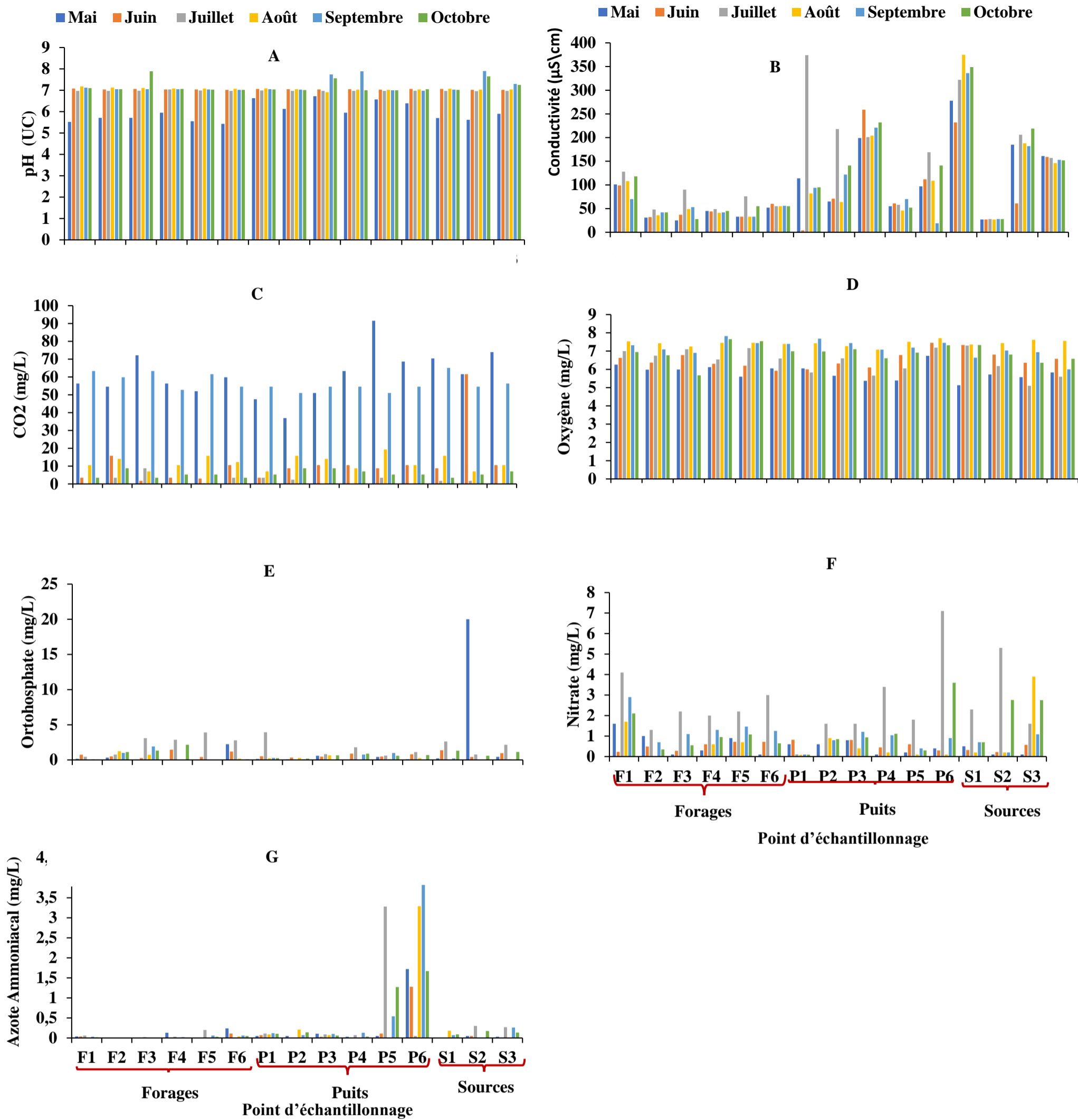


Figure 12 : Variation des paramètres chimiques mesurés pendant la période d'étude en fonction des stations : pH (A) ; Conductivité électrique (B); CO₂ (C) ; O₂ (D) ; Orthophosphate (E) ; Nitrate (F) ; Azote ammoniacal (G).

III-1-2-3- Détermination des paramètres abiotiques susceptibles d'influencer la dynamique d'abondance des bactéries isolées

III-1-2-3-1- Corrélations entre les paramètres physicochimiques, morphométriques et les abondances bactériennes des eaux souterraines

Les corrélations entre les paramètres abiotiques considérés dans l'étude et les densités des bactéries isolées ont été effectuées à l'aide du test de corrélation « r » de Spearman. Il en ressort que des corrélations très significatives et positives ($P < 0,01$) ont été notées, d'une part, entre les densités de BHAM et certains paramètres tels que la couleur ($r = 0,377$), la hauteur des puits ($r = 0,401$), la turbidité ($r = 0,377$) et les MES ($r = 0,330$). D'autre part, l'augmentation de la densité des coliformes fécaux est corrélée à la couleur de l'eau ($r = 0,352$) et aux MES dans l'eau ($r = 0,380$). De plus, des corrélations ont été observées entre les densités de *E. coli* et les paramètres tels que la température ($r = 0,394$) et le CO_2 dissous ($r = 0,276$), ainsi qu'entre les densités de streptocoques fécaux et la température ($r = 0,278$) (Tableau VII).

Une corrélation significative et positive ($P < 0,05$) a également été observée entre les densités de BHAM et certains paramètres tels que le pH ($r = 0,248$) et l'oxygène dissous ($r = 0,257$). D'autre part, des corrélations significatives ont été notées entre les densités de coliformes totaux et la conductivité ($r = 0,263$), la hauteur des puits ($r = 0,266$), les TDS ($r = 0,240$), la couleur ($r = 0,250$) et l'azote ammoniacal NH_4^+ ($r = 0,265$). Une observation similaire a été faite entre les concentrations de *E. coli* et la hauteur des puits. De plus, des corrélations ont été observées entre les densités de coliformes fécaux et des paramètres tels que la température ($r = 0,221$) et le CO_2 dissous ($r = 0,214$). La densité de streptocoques fécaux est également corrélée à la couleur de l'eau ($r = 0,237$) et au CO_2 ($r = 0,234$) (Tableau VII).

Des corrélations significatives ($P < 0,01$) et négatives ont été observées entre les densités de *E. coli* et des paramètres tels que le pH ($r = -0,277$) et l'oxygène dissous ($r = -0,289$). De plus, des corrélations significatives ($P < 0,01$) et négatives ont été notées entre les densités de streptocoques fécaux et les nitrates ($r = -0,303$). Des corrélations significatives ($P < 0,05$) et négatives ont également été observées entre les densités de streptocoques fécaux et l'azote ammoniacal NH_4^+ ($r = -0,210$), ainsi qu'entre *E. coli* et la hauteur de la colonne d'eau ($r = -0,359$) (Tableau VII).

Tableau VI: Corrélations entre les variables bactériologiques, physicochimiques et morphométriques des différentes stations étudiées.

Variables physicochimiques et morphométriques	Variables bactériologiques				
	BHAM	CT	CF	<i>E. Coli</i>	SF
pH	0,248*	-0,198	-0,146	-0,277**	-0,082
Température	-0,023	-0,063	0,221*	0,394**	0,278*
Conductivité	0,060	0,263*	0,136	-0,030	-0,06
TDS	0,097	0,240*	0,173	0,017	-0,074
Oxygène dissous	0,257*	-0,067	-0,072	-0,289**	-0,172
Couleur	0,377**	0,250*	0,352**	0,104	0,237*
Turbidité	0,336**	-0,028	0,150	-0,136	0,008
M.E.S	0,330**	0,075	0,380**	0,127	0,106
Azote ammoniacal NH ₄ ⁺	0,188	0,265*	0,126	0,071	-0,210*
Phosphate PO ₄ ³⁻	-0,132	0,027	0,007	-0,043	-0,170
Nitrate NO ₃ ⁻	-0,201	0,064	-0,091	-0,106	-0,303**
CO ₂ dissous	0,036	0,018	0,214*	0,276**	0,234*

Légende : * = significative au seuil P < 0,05 ; ** = très significative au seuil P < 0,01

III-1-3-3- Comparaison entre les différentes variables analysées

La comparaison entre les variables physicochimiques pendant la durée d'étude a été effectuée dans le temps et dans l'espace à l'aide du test « H » de Kruskal-Wallis. Il en ressort que dans les eaux souterraines les BHAM, coliformes totaux, température, conductivité, TDS, couleur, azote ammoniacal, varient significativement ($p < 0,05$) d'une station à l'autre ($H = 0,001 ; 0,016 ; 0,003 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,004 ; 0,001$ respectivement). Par contre d'un mois à l'autre, les BHAM, coliformes totaux, coliformes fécaux, *E.coli*, streptocoques fécaux, pH, température, O₂ dissous, turbidité, MES, PO₄³⁻, NO₃-et le CO₂ dissous ont significativement varié avec ($p < 0,05$) ($H = 0,009 ; 0,008 ; 0,008 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,004 ; 0,001 ; 0,001 ; 0,001$ respectivement).

III-1-3-4- Affinités entre paramètres bactériologiques et physicochimiques

La carte factorielle obtenue à partir de l'analyse en composantes principales (ACP) montre une distribution des quinze stations d'échantillonnage par rapport à leurs caractéristiques physicochimiques, morphométriques et bactériologiques (figure 15). L'essentiel de la variance totale a été fourni sur les deux premiers axes factoriels F1 (46,05 %) et F2 (14,33 %), ce qui explique 60,38 % de l'inertie totale. Deux grands noyaux émergent dans ce plan factoriel. Noyau 1 (N1) qui comprend les stations : Forages 1 à 6, Sources 1 à 3 ces stations présentent une forte affinité avec les paramètres physicochimiques tels que le CO₂, les nitrates, l'oxygène dissous et les orthophosphates. Cela suggère que ces stations sont influencées par des processus chimiques et biologiques qui augmentent la concentration de ces

éléments dans l'eau. Le noyau 2 (N2), englobant l'ensemble des stations Puits 1 à Puits 6, présente une association positive avec plusieurs paramètres physicochimiques et morphométrique. Parmi les paramètres physicochimiques, on observe des corrélations significatives avec le pH, la température, les solides dissous totaux (TDS), la conductivité, l'azote ammoniacal, ainsi que les matières en suspension (MES), la couleur et la turbidité. Sur le plan morphométrique, des associations sont également relevées avec la hauteur de la colonne d'eau, la hauteur de la margelle et la profondeur des puits.

Ces paramètres sont également positivement associés à l'augmentation des coliformes totaux, des coliformes fécaux, des streptocoques fécaux et des BHAM. Cela suggère que ces stations sont influencées par des facteurs physiques et morphométriques qui favorisent la prolifération de ces bactéries.

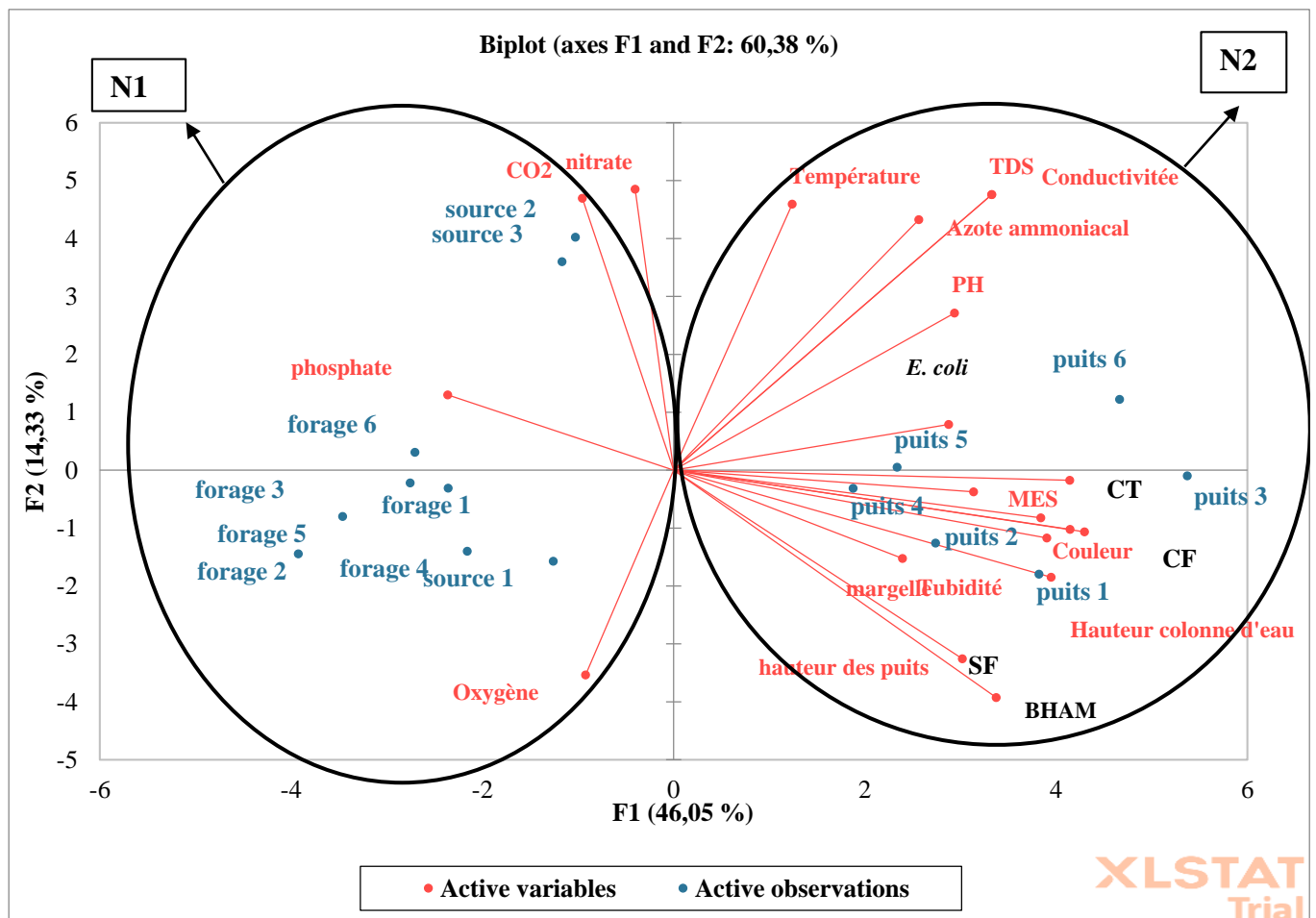


Figure 13 : valeur de l'ACP regroupant les affinités entre les abondances bactériennes et les paramètres abiotiques.

III-2- Discussion

III-2-1- Variation des paramètres bactériologiques

L'analyse bactériologique réalisée a montré que les points d'eau avaient des charges bactériennes élevées si l'on considère leur consommation humaines (OMS, 2004), ce résultat pourrait s'expliquer par l'exposition des structures à la pollution biologique contenant des bactéries qui sont des indicateurs de contamination de matière fécale. Il s'agit des Coliformes totaux, coliformes fécaux et des Streptocoques fécaux. Ces résultats concordent avec plusieurs travaux antérieurs (Manouore Njoya *et al.*, 2021 ; Noah Ewoti *et al.*, 2021b ; Tamsa Arfao *et al.*, 2021b) qui ont noté la présence des bactéries indicatrices d'une contamination fécales dans les eaux souterraines de diverses localités. Les résultats obtenus témoignent d'une contamination récente d'origine fécale et environnementale.

En général, les BHAM ont été présentes dans toutes les stations durant toute la période d'étude. En effet, d'après Levallois et Levesque (2003), le dénombrement de la flore bactérienne aérobie, vise à estimer la densité de la population bactérienne générale. L'abondance des cellules de BHAM fluctuait entre 3 et 7,07 (Log (UFC/100 mL)) . La valeur minimale a été obtenue à F5 et S2 durant le mois de mai, juillet et la valeur la plus élevée en août à S1, avec une moyenne de $4,77 \pm 0,85$. La forte abondance, pourrait être due à la mauvaise protection des puits, des sources et au mauvais entretien des forages, à la méconnaissance des règles d'hygiène de base, à la pollution environnante (existence de fosses septiques et de latrines) et à l'absence de réseau d'assainissement également due au fait que l'environnement de ces stations est propice à leurs développements. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Mouafo Tamnou en 2017 dans les eaux souterraines de la ville de Soa.

Parmi les principaux groupes de bactéries indicateurs de contamination fécale, ceux représentés sont les coliformes totaux, les coliformes fécaux, ainsi que les streptocoques fécaux. Les abondances de ces groupes bactériens ont varié d'une station à l'autre et dans le temps. Les valeurs moyennes des abondances enregistrées ont été de 2,91 ; 1,37 et 0,97 (Log (UFC/100 mL)) respectivement pour les coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux. Les valeurs enregistrées ont toutes été supérieures aux normes 0 UFC/100 mL établies par l'OMS (2004). Ce qui indique par conséquent, une détérioration de la qualité bactériologique de l'eau (OMS,2004). Cette contamination à prédominance animale se ferait dans les puits et la contamination d'origine humaine se ferait dans les forages et de sources qui pourrait être due à des rejets d'eaux usée et activités agricoles ou à des latrines proches. Leur présence dans l'eau indique une contamination récente par des matières fécales. Les eaux souterraines de Leboudi hébergeraient également une microflore pathogène opportuniste, avec notamment des bactéries

telles que *Escherichia coli* avec des densités moyenne de $0,40 \pm 0,19$ (Log (UFC/100 mL)) ; dont les abondances peuvent parfois atteindre 5,17 (Log (UFC/100 mL)). Ces germes peuvent être à l'origine des infections gastroentériques (diarrhée aigue chez les enfants, diarrhée du voyageur etc.) cas des coliformes, les infections des vois urinaires basses, des infections cutanées cas des Streptocoques fécaux de ces eaux (OMS, 2017 ; Allocati *et al.*,2013). La présence permanente de ces bactéries pathogènes et leur abondance élevée traduit le degré de pollution de ces eaux. Des résultats similaires ont été obtenus par Nanga *et al.* (2014) ainsi que par Mabou *et al.* (2023) à Yaoundé où des bactéries indicatrices de contamination fécale y ont été observés. Il en est de même des résultats obtenus par Baleng *et al.* (2022a) à Nkolafamba qui ont montré que les eaux destinées à la consommation humaine hébergent des bactéries indicatrices de contamination fécale mais également des bactéries pathogènes strictes et opportunistes.

III-2-2- Paramètres morphométriques

La mesure de la hauteur de la colonne d'eau qui fluctue entre 0,9 et 3,5 m est un indicateur de la quantité d'eau disponible dans les puits. Ces fluctuations pourraient être dues à la fréquence d'utilisation de ces eaux par les populations locales, et à la saisonnalité. En effet, l'augmentation du niveau piézométrique entraine la diminution temporaire de la hauteur de la colonne d'eau, qui est restaurée avec un certain retard dans le temps par infiltration des eaux de la nappe. À cet effet, Leme Banock *et al.*, (2023) ont constaté que les variations du niveau piézométrique influencent la qualité microbiologique des eaux souterraines (Leme Banock *et al.*, 2023).

III-2-3 Paramètres physicochimiques

Au cours de l'étude, les paramètres physicochimiques des eaux échantillonnées ont varié d'une station à l'autre et d'un mois à l'autre.

Les valeurs de la température de ces eaux de forage, de puits et de sources ont oscillé entre 22,4 et 29,5°C, avec une moyenne générale de $(25,65 \pm 0,45^\circ\text{C})$, compatible avec l'activité des organismes du milieu. Dans ces eaux souterraines, les variations thermiques sont très faibles, du fait de la faible conductibilité du sol (Mafany *et al.*, 2021). Ce résultat est très proche de celui obtenu par Aboubakar *et al.*, (2020) qui ont travaillé sur les eaux de puits dans quelques quartiers de Yaoundé VII. Il a été observé que la température augmente avec l'altitude, ceci s'expliquerait par le fait que plus on descend en profondeur plus il fait chaud. Etant donné que les forages et puits les plus profonds ont été ceux situés en haute altitude, ces valeurs sont compatibles avec l'activité des organismes du milieu.

Le taux de solide totaux dissous de l'eau (TDS) est un paramètre important pour des raisons d'esthétique, de sécurité entre autres. Les valeurs obtenues ont oscillé entre 9 et 261 ppm avec une moyenne de $(56,53 \pm 18,53 \text{ ppm})$, ce qui est cohérent avec les travaux de (Gaboriaud *et al.*, 2006) et seraient dues à des infiltrations d'eaux de ruissellement contenant des sels minéraux, des activités humaines telles que l'agriculture ou l'industrie, ou encore la dissolution de minéraux naturellement présents dans le sol. D'après Moussima Yaka *et al.*, (2020), l'augmentation de TDS peut s'expliquer par la décomposition de la matière organique des microorganismes et matériaux contribuant à leur croissance.

Au cours de l'étude, la teneur en matières en suspensions (MES) a varié de 0 à 103 mg/L, la couleur quant à elle, a oscillé entre 0 à 76 Pt. Co avec une moyenne de $(13,8 \pm 4,76 \text{ Pt. Co})$ et la turbidité a également fluctué tout au long de l'étude autour de 0 et 36 FTU avec une valeur moyenne $(5,6 \pm 3,42 \text{ FTU})$. Ces variations observées pourraient se justifier par une pollution organique associée à un mauvais état de protection de ces puits (absence de couvercle), le non entretien des forages et sources dont les eaux ont été analysées. Les valeurs relativement faibles de MES enregistrées dans certaines stations traduiraient une faible pollution anthropique. Les résultats obtenus sont proches des valeurs prescrites par la norme de l'OMS (2004) sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine qui est de 5 mg/L pour les MES et de 15 Pt. Co pour la couleur. La convergence des résultats obtenus avec la norme de l'OMS (2017) montre que les eaux échantillonnées pourraient être de bonne qualité pour ce qui est de ces paramètres.

Il a été enregistré une valeur moyenne de pH de $6,91 \pm 0,19 \text{ UC}$, indiquant une légère acidité à une quasi-neutralité des eaux étudiées. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de Baleng *et al.*, (2022b) qui a montré que les variations du pH enregistrées dans les systèmes aquatiques souterraines de Yaoundé étaient similaires aux nôtres. Noah Ewoti *et al.*, (2023) expliquent ces résultats par les variations de l'activité agricole, les engrais sont très utilisés et acidifient le milieu. De plus, Nola *et al.*, (2012), déclarent que les augmentations de pH dans les eaux souterraines sont souvent dues à l'action bactérienne et à l'altération des sols.

Au cours de l'étude, la conductivité électrique a oscillé entre 4 et 375 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de $(108,6 \pm 34,1 \mu\text{S/cm})$. Ces fluctuations spatiales résulteraient de l'influence des activités anthropiques au niveau des points d'eau, mais aussi aux variations de la concentration des sels dissous. De plus, la minéralisation des eaux souterraines dépendrait de plusieurs paramètres dont la nature minéralogique des roches traversées, le temps de contact avec les minéraux, la vitesse de circulation de l'eau, le temps de renouvellement de l'eau de l'aquifère et du pluviolessivage. (Lagnika *et al.*, 2014)

Les valeurs des teneurs en CO_2 dissous oscillent entre 0 et 91,52 mg/L. Selon Rodier *et al.* (2009), ces teneurs sont influencées par le climat et les saisons, ainsi que par la nature du sol

et de la végétation. Les teneurs élevées en CO₂ dissous enregistrées résulteraient des processus métaboliques, principalement de la respiration de la flore microbienne des eaux, et aux eaux de pluies qui déchargent le CO₂ atmosphérique dans l'eau (Lontchi Segnou *et al.*, 2023).

Les teneurs en Oxygène dissous ont oscillés entre 5,1 à 7,82 mg/L avec une moyenne de $6,18 \pm 0,16$ mg/L. Ce résultat se rapproche de ceux obtenus par (Nougang *et al.*, 2011) dans les eaux souterraines près des côtes où un taux de saturation faible en oxygène dissous a été enregistré. Ces teneurs faibles suggèrent la présence dans ces eaux souterraines de matières réductrices, notamment des matières organiques et des bactéries hétérotrophes consommatrices d'oxygène (Zhang *et al.*, 2020).

Les teneurs en Azote ammoniacal tout au long de cette étude ont variées avec une moyenne enregistrée de $0,24 \pm 0,19$ mg/L de NH₄⁺. Selon Rodier (2009), des concentrations supérieures à 0,3 mg/L de NH₄⁺ témoignent d'une importante pollution organique. La présence d'azote ammoniacal dans les eaux de puits résulterait d'une contamination de surface liée essentiellement aux rejets d'effluents domestiques ou un phénomène de réduction naturelle des nitrates par des bactéries qui s'y trouvent (Nougang, 2012). S'agissant des teneurs en Nitrate, La valeur moyennes enregistrée a été de $1,1 \pm 0,69$ mg/l de NO₃⁻ sont dans la norme de l'OMS (2017) pour les eaux de consommation et ces résultats s'éloignent très fortement à ceux obtenues par (Mabou Tokam *et al.*, 2023) qui ont analysés les eaux souterraines de la commune de Mbankomo . Au regard de cette concentration inférieure à 3 mg/L, l'OMS (2017) est d'avis que l'eau échantillonnée pourrait être de bonne qualité.

Concernant la concentration en Orthophosphate (PO₄³⁻), elles ont été faibles pendant toute la période d'étude avec une moyenne de $0,71 \pm 0,5$ mg/L. Ces résultats se rapprochent de ceux de (Dadji *et al.*, 2016) et seraient dues à la faible utilisation d'engrais phosphatés dans cette zone.

III-2-4 Liaison entre les paramètres évalués

Les tests de corrélations effectués entre les variables physicochimiques, morphométriques et biologiques montrent que certaines variables ont influencé significativement sur le peuplement et la distribution des bactéries tout au long de cette étude.

Il en ressort de ces analyses que, l'augmentation du pH de l'eau accroît significativement l'abondance des BHAM et diminue très significativement l'abondance de *Escherichia coli*. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que l'espèce soit au voisinage de son pH optimal de croissance. A ce propos, Nola *et al.*, (2012) ont montré que dans un milieu donné, les augmentations de pH favorisent parfois le développement de certaines espèces bactériennes.

L'augmentation de la température accroît significativement l'abondance des coliformes fécaux, *E. coli* et streptocoques fécaux et l'augmentation de la conductivité, des TDS et l'azote ammoniacal accroît significativement avec les coliformes totaux. Ceci s'expliquerait par le fait

que certaines bactéries survivent mieux à des températures comprises entre 4 et 44,5°C. En effet, plusieurs études ont pu indiquer que l'augmentation de la concentration des coliformes est expliquée par la température (Turner *et al.*, 2009 ; Baker-Austin *et al.*, 2013).

L'augmentation de la couleur accroît significativement l'abondance des BHAM, coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux ; l'augmentation de la turbidité et de MES accroît très significativement avec les BHAM et les coliformes fécaux

L'augmentation des teneurs en NH_4^+ et NO_3^- entraîne une diminution significative de la densité des streptocoques fécaux et une augmentation significative des coliformes totaux pour la teneur en NH_4^+ . Cette différence se traduirait par le fait que les bactéries réagissent différemment face à la matière organique et en fonction de la composition de celle-ci. En effet, la matière organique influence la disponibilité des nutriments en servant en même temps comme source d'énergie et de carbone pour certains microorganismes (Nola *et al.*, 2004).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) met en évidence une structuration pertinente des stations d'échantillonnage. La répartition des quinze stations en trois noyaux distincts suggère une influence spécifique des paramètres physicochimiques et morphométriques. Dans le noyau 1 (N1), qui inclut les stations de forage et de source, une forte affinité est observée avec des paramètres tels que le CO_2 , les nitrates, l'oxygène dissous et les orthophosphates. Cette corrélation pourrait indiquer un enrichissement chimique directement influencé par des processus biologiques. Le noyau 2 (N2), constitué des stations Puits 5 et Puits 6, présente une association marquée avec des facteurs comme le pH, la température, la conductivité et l'azote ammoniacal. Ces éléments jouent un rôle clé dans la prolifération d'*Escherichia coli*, suggérant une contamination microbiologique en lien avec les conditions physicochimiques du milieu. Quant au noyau 3 (N3), il dévoile une dynamique distincte. Les stations Puits 1 à 4 montrent une forte corrélation avec les MES, la turbidité, la hauteur de la colonne d'eau ainsi qu'avec des bactéries indicatrices de contamination telles que les streptocoques fécaux et les coliformes totaux. Ces résultats suggèrent que des paramètres physiques et morphométriques favorisent la prolifération de ces microorganismes. Cette structuration révèle donc des interactions complexes entre les caractéristiques environnementales et la contamination bactérienne, offrant une observation approfondie des facteurs influençant la qualité des eaux souterraines. (Tamsa Arfao *et al.*, 2021a) à ce propos suggère que les variables physico-chimiques, microbiologiques et morphométriques interagissent de manière complexe, reflétant les processus complexes se produisant dans l'environnement naturel.

CONCLUSION :
RECOMMANDATIONS ET
PERSPECTIVES

Au terme de cette étude dont l'objectif principal était d'analyser l'impact des facteurs abiotiques sur la dynamique d'abondance des germes témoins de la contamination fécale dans les eaux souterraines à Leboudi (Région du Centre-Cameroun), il en ressort que les analyses bactériologiques ont relevé la présence des germes indicateurs de pollution fécale à des proportions élevées et non recommandables pour les eaux de consommations. Ces bactéries pourraient être responsables chez l'homme des gastro-entérites, des infections urinaires et infections cutanées et pourraient provenir soit d'une pollution d'origine humaine soit d'une pollution animale.

Les eaux analysées sont caractérisées par une légère acidité, une faible minéralisation, une oxygénation suffisante et une pollution organique modérées. Les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, la température, les solides totaux dissous, la turbidité, la couleur, les matières en suspensions, l'oxygène dissous, le CO₂, les nitrates, l'orthophosphate et l'azote ammoniacal ont eu une influence sur la répartition spatio-temporelle des bactéries isolées. Les eaux souterraines échantillonnées ne devraient pas être utilisées comme eaux de consommation sans traitement préalable.

A l'issue des résultats obtenus et des conclusions qui en découlent, il pourrait être recommandé :

❖ **Aux populations**

- de traiter leurs eaux par les méthodes d'ébullition ou de traitement par l'ajout de chlore avant consommation ou quelconque utilisation ;
- le respect des règles d'hygiène afin d'éviter les maladies hydriques liées à l'eau.

❖ **Aux pouvoirs publics**

- d'étendre le réseau d'adduction d'eau potable dans toute la ville de Leboudi afin de limiter l'usage des eaux de qualité douteuse par la population ;
- la mise en place d'un programme d'information, d'éducation et de communication en direction des populations pour leur faire acquérir des comportements favorables à la préservation des ressources en eaux.

❖ **Pour les travaux futurs, nous envisageons:**

- d'étendre cette recherche dans toute la localité et pendant une période d'étude plus longue.
- d'approfondir cette recherche en testant la sensibilité ou résistance de ces germes bactériens isolés à divers antibiotiques, afin de contribuer au meilleur contrôle et à l'éradication des maladies causées par ces germes.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- Abahi K. S., Gouissi M. F., Akodogbo H. H., Sanni W. S. H., Adje A. S. D. D. & Gnohossou P. M. (2020).** Assessment of the water quality of the upper reaches of the Ouémé River in benin using benthic macroinvertebrate-based biotic indices. *Revue des Sciences de l'Eau*, 32(4) : 433-444.
- Abossolo S. A., Amougou A. A., Tchindjang M., Mena M. S. & Batha R. A. S. (2015).** Analyse des précipitations annuelles à la station de Yaoundé de 1895 à 2006, *Afrique sciences* 11(2) :183-194.
- Aboubakar A., Zing Z. B., Nzeket A. B., Moussima Yaka. D. A., Tchudjo T. A. N., Mfopou M. Y. C. & Madong C. R. B. A. (2020).** Effects of amendments on growth, yield and chemical composition of black nightshade in suburban areas of Yaoundé, Cameroon. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(6):2134-2146. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20219984836>
- Abowei J. F. N., Davies O. A. & Eli A. (2010).** Physicochemistry, morphology and abundance of fin fish of Nkoro River, Niger Delta, Nigeria. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 6(2): 1-11.
- Agassounon D. T., Ayi-Fanou L., Lozes E., Fadonougbo R., Anago G., Agbangla C. & Ahanhanzo C. (2012).** Impacts sanitaires liés à l'usage des eaux de puits, à l'assainissement à Gbôdjê dans l'arrondissement de Godomey au Bénin. *International Journal of Biological and chemical sciences*, 6(2): 592-602.
- Allocati N., Masulli M., Alexeyev M. F. & Ilio C. D. (2013).** Escherichia coli in Europe: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 10(12): 6235-6254.
- Amenan L. C., Mangoua-Allali N'da Adjo., Kouame C. & Coulibaly L. (2021).** Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits et du marigot de la ville de Bocanda, Côte d'Ivoire, pp 27-166.
- APHA (2009).** Méthodes standard pour l'Examen de l'eau et des eaux usées. *American Public Health Association*, APHA- AWWAWPCF (23e éd.) *Pennsylvanie, Washington*.
- Arfib, B., (2022).** L'hydrogéologie des Bouches-du-Rhône. *Journée internationale de la géodiversité (Unesco)*. <https://hal.science/hal-03837489/>
- Baker A. C., Wright M. S., Stepanauskas R. & McArthur J. V. (2013).** Co-selection of antibiotic and metal resistance. *Trends in Microbiology*, 21(8): 338-346.
- Baleng S. D., Noah E. O. V., Kenne B. P. T., Metsopkeng C. S., Djiala M. R. T., Ladibé P. & Nola M. (2022a).** Seasonal Variation and Diversity of Bacteria of the *Vibrio* and *Salmonella* Genera Isolated in a Few Underground Water Points Developed in the Commune of NTUI (Mbam-Et-Kim Department, Center-Cameroon). *International Journal of Research-Granthaalayah*, 10(10): 66-87.
- Baleng S. D., Noah E. O. V., Kenne B. P. T., Metsopkeng C. S., Djiala M. R. T., Ladibé P. & Nola M. (2022b).** Seasonal Variation and Diversity of Bacteria of the *Vibrio* and *Salmonella* Genera Isolated in a Few Underground Water Points Developed in the Commune of NTUI (Mbam-Et-Kim Department, Center-Cameroon). *International Journal of Research-Granthaalayah*, 10(10): 45-67.

- Bhat R. A., Shafiq, U., R., Mehmood, M., A., Dervash, M., A., Mushtaq, N., Bhat, J., I., A., et Dar, G., H., (2017).** Current status of nutrient load in Dal Lake of Kashmir Himalaya. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 165–169.
- Blanchon D. & Boissière A. (2022).** Le cycle hydrologique de la planète. Dans *Atlas mondial de l'eau: Défendre et protéger notre bien commun*, 12-13.
- Bolot F. & Bolot J. F. (2021).** Influence des grandes épidémies sur le cours de l'histoire : pour mieux comprendre la pandémie, un texte de 1979 : 1-93.
- Bomgning F. B., Gueguim C., Yondo A., Ngouoyou M., Ragon A. & Kanga G. H. (2022).** Étude de la qualité microbiologique des eaux souterraines du district Don Bosco de Mimboman dans la ville de Yaoundé, au Cameroun. *American Journal of Biomedical and Sciences*, 10(1): 1-6.
- Boutin S., Bernatchez L., Audet C. & Derôme N. (2012).** Antagonistic effect of indigenous skin bacteria of brook charr (*Salvelinus fontinalis*) against *Flavobacterium columnare* and *F. psychrophilum*. *Veterinary Microbiology*, 155: 355-361.
- Bugno A., Almodóvar A. A. B. & Pereira T. C. (2010).** Enumeration of heterotrophic bacteria in water for dialysis: Comparison of the efficiency of Reasoner'2 agar and plate count agar. *Brazilian Journal of Microbiology*, 41:15-18.
- CEACQ. (2015).** Détection et dénombrement simultanés des coliformes fécaux et *Escherichia coli* dans l'eau potable avec milieu de culture MI ; méthode de filtration membranaire. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.
- Dadji G. A. F., Meguie J. Z., Ajeegah G. A., Takougang I. & Tamesse J. L. (2016).** Diversité culicidienne dans un cours d'eau anthropisé de la ville de Yaoundé, Cameroun : Importance des facteurs environnementaux. *Afrique SCIENCE*, 12(6) : 282-294.
- Diagnostic Pasteur (1987).** Milieux et réactifs de laboratoire Pasteur. Maury M., 3^e édition, Paris, P 727.
- Djaouda M., Lecke A., Kalwé., Maine. M., Wadoube Z. Liang S., Nola M. & Njine T. (2018).** Evaluation de la qualité bactériologique des eaux souterraines des forages de Maroua (Extrême-Nord Cameroun). *Revue Internationale des Sciences Biologiques et Chimiques*.12 (2) : 958-974.
- Elbing K. & Brent R. (2019).** *Escherichia coli* and its role in gastroenteritis. *Journal of Infectious Diseases*, 220(3) : 123-134.
- Essouli O. F. (2021).** Hydrochimie des eaux de surface et souterraines de la partie nord de Brazzaville : Origine et processus de minéralisation. *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur* 2(1) : 1-15
- Gaboriaud F., Dague E., Bailet S., Jorand F., Duval J. & Thomas F. (2006).** Multiscale dynamics of the cell envelope of *Shewanella putrefaciens* as a response to pH change. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 52(2) : 108-116.
- Ghaleb Z. & Mokrani K. (2019).** *Amélioration de la qualité physico-chimique et bactériologique par filtre élaboré des eaux de forages de Boukhalfa* [PhD Thesis, Université Mouloud Mammeri]. <https://dspace.ummt.dz/items/b4f98205-a035-4c40-8711-fb6e06b2c9d8>
- Gijo J., Pavan K. K., Sujatha G. S., Surya K. & Bala K. R. (2015).** *Enterococcus faecalis*, a nightmare to endodontist: A systematic review. *African Journal of Microbiology Research*, 9(13): 898-908.

- Guerrouf N. (2023).** Etude comparative entre deux procédés du traitement : la phyto-épuration et la coagulation-floculation dans l'élimination des composés inorganiques présents dans les eaux usées de la ville de Biskra (*Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA*).
- Hill C. & PATEL D. (2023).** *Colonisation de surfaces rocheuses par des microorganismes dans un aquifère* à. <https://archipel.uqam.ca/17704/1/M18553.pdf>
- Holt J. G., Krieg N R., Sneath P. H. A., Staley J. T. & Williams S. T. (2000).** Bergey's manual of determinative bacteriology. 9 th edition. *Lippon cott Williams and Wilkins, Philadelphia.* 62-75.
- Jubelin G. (2005).** Formation de biofilms par Escherichia coli K-12 : rôle des systèmes à deux composants dans la synthèse des curlis. *Thèse de Doctorat de l'institut National des Sciences Appliquées de Lyon.* 66.
- Kambiré O., Adingra A. A., Eblin S. G., Aka N., Kakou A. C. & Koffi N. R. (2014).** Caractérisation des eaux d'une lagune estuarienne de la Côte d'Ivoire : La lagune Aby. *LARHYSS Journal* P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 20. <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/237>.
- Kpiagou P., Tchegueni S., Boguido G., Sama D., Gnandi K., Tchacondo T. & Glitho A. (2022).** Evaluation de la pollution des ressources en eau du bassin versant de Didagou (Dapaong, Nord-Togo). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 16 (1) : 481-497.
- Lagnika M., Ibikounlé M., Mazou F., Sakiti N. & Boutin C. (2014).** Diversité faunistique et qualité physico-chimique de l'eau des puits à Parakou (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle de Toulouse*, 150 : 59-72.
- Lee K. & Kim H. (2018).** "Microbial Quality in Aquatic Systems: The Role of Morphometric Properties. *Environmental Microbiology*, 22(4) : 456-468.
- Leme L. L., Mounang L. M., Arfao A. T., Ladibé P., Ewoti O. V. N. & Togouet E. S. H. Z. (2023).** Multirésistance des entérobactéries isolées du cours d'eau Olézoa et des eaux souterraines de son bassin versant (Région du Centre, Cameroun). *Current Science*, 3(6): 422-445.
- Levesque B. & Levallois P. (2003).** Bactéries hétérotrophes aérobies mésophiles, Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, *Institut national de santé publique du Québec*, 3 p.
- Lontch S. V., Kweyang B. P. T., Koji E., Tchakonte S., Tokam M. P. M., Ewoti O. V. N., Onana F. M., Kweya O. E. W. & Arfao A. T. (2023).** Niveau de pollution bactériologique et physicochimique des eaux de surface en Zone rurale : le cas de la municipalité de Mbankomo Ville (Région du Centre, Cameroun), *Journal Géosciences et Environnement Protection*, 11 : 173-188. <https://doi.org/10.4236/gep.2023.113012>
- Mabou T. M. P., Lontchi S. V., Tamatcho K. B. P., Koji E., Tchakonte S., Noah E. O. V., Onana F. M., Wandji K. O. E. & Tamsa A. A. (2023).** Qualité bactériologique et physicochimique des eaux souterraines de la commune de Mbankomo. *Journal des Sciences et de l'Ingénierie de l'Environnement*, 12(3) :115-127. DOI: 10.17265/2162-5263/2023.03.002. Consulté le 26 février 2025, à l'adresse https://www.memoireonline.com/03/24/14516/m_Contribution--letude-de-la-qualite-physicochimique-et-bacteriologique-des-points-deau-dan2.html.
- Mafany G., Tamnou E. B. M., Ekoa B. A. Z., Ndjama J., Machuetum G. L., Noubouossie F. A. T. & Nola M. (2021).** Evaluation of the Influence of Some Abiotic Factors on the

Microbiological Quality of Groundwater in Soa Sub-division, Cameroon, Africa. *Annual Research & Review in Biology*, 36(12): 126-137.

- Manouore N., Poutoum Y. Y., Eheth J. S., Mouafo T. E. B. & Noah E. O. V. (2021).** Antibiotic susceptibility of four Enterobacteriaceae strains (*Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, *Salmonella typhi* and *Shigella sonnei*) isolated from wastewater, surface water and groundwater in the equatorial zone of Cameroon (Central Africa). *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 11: 120–137.
- Marchal N., Bourdon J. L. & Richard C. I. (1991).** Les milieux de culture pour l'isolement et l'identification biochimique des bactéries. Doined, Paris, 226.
- Merbouh C., Belhsaien K., Zouahri A. & Iounes N. (2020).** Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines au voisinage de la décharge contrôlée de Mohammedia-Benslimane. *European Scientific Journal*, 16(6). ISSN : 1857-7881 / 1857-7431.
- Misstear B., Banks D. & Clark L. (2017).** Water wells and boreholes. John Wiley & Sons.
- Mouafo E. (2017).** Importance des entérobactéries dans quelques points d'eaux souterrains de l'arrondissement de Soa : influence de quelques facteurs abiotiques. *Mémoire de master facultés des sciences, université de Yaoundé I.* 47p
- Moungang L. M., Nola M., Noah E. O. V., Nougang M. E., Lontsi D. C., Tamsa A. A. & Nandjou, N., R., V., (2013)** Assessment of the abundance of *Staphylococcus aureus* and *Listeria monocytogenes* adhered on Granitic and Basaltic Rock- Fragments Immersed in Wells, in the Equatorial Region in Cameroon(Central Africa) *International Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1 (3): 283-294.
- Moussa H. C. (2014).** Evaluation de la qualité de l'eau du bassin supérieur de la rivière du Litani, Liban : approche hydrogéochimique. *Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, France*, 329.
- Moussima Y. D. A., Tiemeni A. A., Bertrand Z. Z. B., Jokam N. T. L. L., Aboubaka, A., Nzeket A. B., Fokoung T. B. H. & Mfopou M. Y. C. (2020).** Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines et risques sanitaires dans quelques quartiers de Yaoundé VII, Cameroun. *Revue internationale de Sciences biologiques et chimiques*, 14(5) : 1902-1920.
- Nanga N., Ngene J. P., Tsala D. E., Ngoule C. & Lamare N. (2014).** Relation entre Pollution des Eaux de Sources, Forages et Maladies Hydriques Enregistrées au Centre Hospitalier Dominicain Saint Martin de Porres (CHDSMP) du Quartier Mvog-Betsi à Yaoundé. *Health Sciences and Diseases*, 15 (3): 1-8.
- Noah Ewoti O. V., Nola M., Nougang M., Moungang M. L., Chihib N. E., Krier F., Servais P., Hornez J. P., & Njine, T. (2010).** Involvement of cell shape and flagella in bacterial retention during percolation of contaminated water through soil columns in tropical region. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 45(11): 1297-1306.
- Noah E. O. V. (2012).** Rétention des bactéries dans le sol et sur les fragments de roche en milieu aquatique : Influence du type de cellules et de quelques paramètres chimiques de l'environnement. *Thèse de Doctorat/phD. DBPA. Faculté des sciences. Université de Yaoundé I.* 143.
- Noah E. O. V., Tamsa A. A., Baleng S. D., Moungang L. M., Metsopkeng C. S., Kayo R. P. T., Poutoum Y. Y., Menye D. E. & Nola M. (2021a).** Microbiological and physicochemical

quality of some water points in the Nkolafamba Subdivision (Center Region, Cameroon). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 15(2), Article 2.

- Noah E. O. V., Arfao T. A., MOUNGANG L. M., Kolkossok B. U. (2021 b).** “Dynamics of abundances of *Vibrio* sp in some rivers: impact of physicochemical factors”. *International Journal of Current Research*, 13: 18599-18609.
- Noah E. O. V., Baleng S. D., Song O. S. R., Mboene Mboene R., Ladibé P., Djiala Tagne M.R., Kolkosok Badouana U., Yogne Poutum Y., Noah S. A. & Nola M. (2023).** Impact of heavy metal residues on the diversity of bacteria isolated from a few water points in areas of agricultural activity. *GSC Biological and Pharmaceutical Sciences*, 23(3): 060-074.
- Nola M., Njiné T. Boutin C. Messouli M. Servais P. Foto Menbohan S. Ngo Bidjeck L. M., Zébazé Togouet H. S. & Kemka N. (2004).** Retention of *Escherichia coli* from water infiltration in the equatorial soil in Cameroon (Central Africa): The role of various soil layers. *Journal of Cameroon Academy of Sciences*, 2: 107-116.
- Nola M., Nougang M. E., Bessa H. A., Kweyang B. P. T., Ewoti O. V. N. & MOUNGANG L. M. (2011).** Prevalence of pathogenic strains of *Escherichia coli* in urban streams in the equatorial region of Cameroon (Central Africa). *Journal of Applied Biosciences*, 48: 3293-3305.
- Nola M., Noah E. O. V., Nougang M., MOUNGANG M. L, Chihib N. E., Krier F., Servais P., Hornez J. P. & Njine T. (2012).** Implication de la forme cellulaire et des flagelles rétention bactérienne lors de la percolation de l'eau contaminée à travers les colonnes de sol région tropicale, *Journal des sciences de l'environnement et de la santé*. 45(11): 1297-1306.
- Nougang M. E., Djuikom E., Noah E. O. V., MOUNGANG L. M. & Ateba B. H. (2011).** Abondance de coliformes fécaux et d'*E. coli* pathogènes dans les eaux souterraines de la Zone côtière du Cameroun (Afrique centrale) et relations avec certains organismes abiotiques Paramètres. *Current Research Journal of Biological Sciences*, 3 (6): 622-632.
- Nougang M. E. (2012).** Souches pathogènes d'*Escherichia coli* dans les eaux souterraines et de surface des villes de Douala et Yaoundé (Cameroun), et importance de quelques facteurs abiotiques. *Cameroun : Université de Yaoundé I*.
- OMS (2004).** Directives de qualité pour l'eau de boisson, critères d'hygiène et documentation à l'appui. Vol. 2, 2^e édition, 1050.
- OMS (2011).** Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth edition, WHO Library Cataloguing-in-Publication Data ISBN, 541.
- OMS (2017).** Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum. 586.
- OMS (2022).** Genève, Directives pour la qualité de l'eau potable : 3e édition. Chapitre 11.
- Rodier J., Legub B. & Merlet N. (2009).** L'analyse de l'eau. 9e édition, DUNOD, Paris, 1579.
- Rodier J., Legube B. & Merlet, N. (2016).** *L'analyse de l'eau : Contrôle et interprétation* (10e éd. Entièrement mise à jour).
- Rodriguez A. J. B. (2017).** Influence des variations des facteurs environnementaux sur la croissance de poissons de l'atlantique [PhD Thesis, Agrocampus Ouest]. <https://theses.hal.science/tel-01661628/>
- Roose É., Sabir M. & Laouina A. (2010).** Gestion durable des eaux et des sols au Maroc : Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. *IRD Editions*.

- Santé Canada (2012).** Recommandations pour l'eau potable au Canada ; document technique, total coliformes.
- Taban B. M., Dogan H. H. B. & Halkman A. K. (2014).** Microflora of the intestine Biology of the Enterococcus spp. In *Encyclopedia of Food Microbiology*. Elsevier. 652-657.
- Tamsa A. A., Onana F. M., Kodji E., MOUNGANG L. M., Noah E. O. V., Tchumaleu E. J. B., Tchakonté S., Njoya A. M., Sime-Ngando T. & Nola M. (2021a),** Using principal analysis to assess water quality from the landing stage in coastal region. *American Journal of Water Resources* 9: 23-31.
- Tamsa A. A., Onana M. F., MOUNGANG M. L., Tchumaleu E. J. B., Noah E. O. V. & Nola M. (2021b),** Modèle de distribution de l'abondance des vibrionaceae sur les débarcadères en zone côtière : comprendre l'influence des variables physicochimiques en utilisant des méthodes linéaires multiples. *Journal africain de recherche en microbiologie*, 6 : 304 - 317.
- Tchakonté S. (2016).** Diversité et structure des peuplements de macroinvertébrés benthiques des cours d'eau urbains et périurbains de Douala (Cameroun). Thèse de Doctorat/PhD, Facultés des Sciences, 588.
- Togue F. K., Kuate G. L. O. & Oben L. M. (2017).** Physico-Chemical characterization of the surface water of Nkam River using the Principal Component Analysis. *Journal of materials and Environmental Sciences*, 8(6): 1910 -1920.
- Turner A. M., Turner S. E. & Turner J. R. (2009).** Influence of temperature on the concentration of coliforms in water. *Journal of Environmental Science*, 21(4) : 123-130.
- Urien N. (2015).** *Modélisation de la bioaccumulation des métaux par voie dissoute chez le genre Gammarus : Influence des facteurs environnementaux et de l'histoire de vie des organismes* p. 246 [Phd thesis, Université Claude Bernard - Lyon I]. <https://theses.hal.science/tel-01273362>.
- Vilaginès R. (2003).** Eau, environnement et santé publique. Lavoisier ed, Paris, p 236.
- UNICEF JMP / WHO (2021),** Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs
- WHO (2022).** Drinking-water. Consulté 04 novembre 2022, à l'adresse <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Zébazé T. S. H., Tuékam K. R. P., Boutin C., Nola M. & Foto S. (2014).** Impact de la pression anthropique sur l'eau et la faune aquatique des puits et sources de la région de Yaoundé (Cameroun, Afrique Centrale). *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse*, 147: 27- 41.
- Zhang X., Zheng S. & Wang R. (2020).** Effect of dissolved oxygen concentration (microaerobic and aerobic) on community structure and activity of culturable heterotrophic nitrifying bacteria in activated sludge. *Chemistry and Ecology*, 36(10).