

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

**CENTRE DE RECHERCHE ET
DE FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES TECHNOLOGIE
ET GÉOSCIENCES**



REPUBLIC OF CAMEROON

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

**POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY
AND GEOSCIENCES**

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

**LABORATOIRE DE GÉOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET
APPLICATIONS**

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF EXTERNAL FORMATIONS AND APPLICATIONS

**CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE
DU BASSIN VERSANT DE BADOMBÉ, EST- CAMEROUN**

MEMOIRE

présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences de la Terre

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Option : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Par

MOUMBAGNAM Abdou Fatahi

Matricule : 15N2381

Licencié ès-Sciences de la Terre



Sous la direction de

NDAM NGOUPAYOU Jules Remy

Professeur

Année académique 2023-2024

A

Mon papa Moussa MEFIRE
A ma feu Grand-mère Adija NZEKET

REMERCIEMENTS

Au moment où s'achève ce travail, j'adresse tout d'abord mes remerciements au Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé santé, force et courage nécessaires à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit :

A Monsieur le Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, Monsieur le Chef de Département des Sciences de la Terre, et tous les enseignants de la spécialité Géosciences des Formations Superficielles et Applications pour leur encadrement académique durant notre formation ;

- Au Professeur **NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy** qui a gracieusement accepté la direction de ce travail et y a apporté des éléments nécessaires pour son amélioration;
- du Docteur **Achille Basile ANABA ONANA**, pour le suivi et les encouragements ayant concourus à la réussite de ce travail ;
- des Docteurs **Donald Hermann FOSSI** et **Daouda NSANGOU** pour l'orientation, les multiples conseils, le soutien moral et financier;

-de mon grand frère **Assan Mfouapon** pour les conseils, soutiens morales et matériels. Que le très haut t'accorde une longue vie, santé et veille sur toi dans l'exercice de tes fonctions.

-de mes oncles **Yashin Soulemane POUAKONE** et **Mama PELENA** pour le soutien financier et matériel ;

- de ma maman **Remletou MIMANDI** pour l'attention, le soutien moral et financier que le très haut t'accorde une longue vie et santé de fer ;

- de mon frère et ami **Fabrice Kamdem** pour les multiples conseils et le soutien financier ;

- de mes camarades de promotion pour leur appui multidimensionnel, particulièrement à **Steve NGASSAM**, **Derrick KENGNI** qui m'ont accompagné pendant les travaux ;

- enfin, A tous ceux qui, de près ou de loin n'ont ménagé aucun effort pour la réussite de ce travail.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	Erreur ! Signet non défini.
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	viii
RÉSUMÉ.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE ET TRAVAUX	
ANTERIEURS.....	3
I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN DE LA ZONE D’ETUDE	3
I.1.1. Situation géographique et administrative	3
I.1.2. Contexte climatique.....	4
I.1.2.1. Précipitation	4
I.1.2.2. Température	4
I.1.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)	4
I.1.2.4. Indice d’aridité de Martonne.....	4
I.1.3. Végétation et faune.....	6
I.1.4. Orohydrographie	6
I.1.4.1. Orographie	6
I.1.4.2. Hydrographie	7
I.1.5. Géologie	8
I.1.5.1. Substratum géologique.....	8
I.1.5.2. Pédologie.....	9
I.1.6. Cadre humain	10
I.1.6.1. Population	10
I.1.6.2. Activités socioéconomiques.....	10

I.2. QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS EFFECTUES DANS LA ZONE D'ETUDE ET SES ENVIRONS.....	10
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	12
II.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE ET CARTOGRAPHIQUE.....	12
II.2. TRAVAUX DE TERRAIN.....	12
II.2.1. Reconnaissance du site d'étude	12
II.2.2. Présentation du site d'étude	12
II.2.3. Choix et description des points suivis et prélevés	13
II.2.4. Suivi piézométrique	14
II.2.5. Prélèvement et conditionnement des échantillons d'eau	15
II.3. TRAVAUX DE LABORATOIRE.....	18
II.3.1. Mesure des paramètres physiques en laboratoire.....	18
II.3.2. Analyse des paramètres chimiques	18
II.3.2.1. Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)	18
II.3.2.2. Anions majeurs (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-})	19
II.3.2.3. Eléments en trace (F^- , PO_4^{3-} et NH_4^+).....	19
II.3.2.4. Balance Ionique (BI)	19
II.3.3. Analyse des paramètres bactériologiques	20
II.3.3.1. Protocole et principe de mesure.....	20
II.3.3.2. Matériel utilisé.....	20
II.3.4. Méthode de traitement des données	21
II.3.4.1. Méthode d'interpolation des données piézométriques	21
II.3.4.2. Méthode hydrochimique.....	22
II.3.4.3. Méthode statistique.....	22
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	24
III.1. CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFÈRE	24
III.1.1. Données piézométriques.....	24
III.1.2. Cartes piézométriques.....	26
III.2. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE L'ACQUIFERE	30
III.2.1. Variation spatio-temporelle des paramètres physiques	30
III.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH).....	30
III.2.1.2. Température	31
III.2.1.3. Conductivité électrique (CE).....	31

III.2.1.4. Total dissolved solid (TDS)	31
III.2.1.5. Turbidité	32
III.2.1.6. Matière en suspension (MES)	32
III.2.2. Variation spatiale des paramètres chimiques.....	33
III.2.2.1. Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et TZ^+	33
III.2.2.2. Anions majeurs (HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^-) et TZ^-	34
III.2.2.3. Balance ionique	34
III.2.2.4. Eléments traces (PO_4^{3-} , F^- , NH_4^+).....	34
III.2.2.5. Faciès hydrochimiques	38
III.2.3. Variation spatiale des paramètres bactériologiques.....	39
III.3. VARIATION STATISTIQUE MULTIVARIEE ET ORIGINE DES ELEMENTS DISSOUS DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE L'ACQUIFERE LIBRE DU SECTEUR D'ETUDE	40
III.3.1. Analyse statistique multivariée.....	40
III.3.1.1. Matrice de corrélation	40
III.3.1.2. Analyse en composante principale (ACP).....	44
III.4. Origines des paramètres physico-chimiques.....	45
III.5. Origine des paramètres bactériologiques	47
III.6. FACTEURS DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE D'ETUDE EN RAPPORT AVEC LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN	47
III.6.1. Activités anthropiques	47
III.6.2. Le type d'aquifère et de nappe	47
III.6.3. Géologie.....	47
III.7. CLASSIFICATION DES EAUX PAR LE DIAGRAMME DE WILCOX	48
III.8. QUELQUES SOLUTIONS PROPOSEES POUR AMELIORER LA QUALITE DES EAUX DU SECTEUR D'ETUDE.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
ANNEXES.....	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation géographique (Extraite de la carte topographique de Bertoua et image SRTM N°f03-n004e013).....	3
Figure 2: Diagramme ombrothermique à la station de Bertoua aéroport (2007 à 2020).....	5
Figure 3: Bloc diagramme du bassin versant Badombé (image SRTM N°f03-n004e013). ..	7
Figure 4: Carte hydrographique du secteur d'étude. (Extraite image SRTM N°f03-n004e013)	8
Figure 5: Carte géologique du bassin versant de Badombé. (Extraite de la carte géologique du cameroun à 1/200000, Feuille Bertoua (NB-33-II))	9
Figure 7 : Carte d'échantillonnage.....	14
Figure 8 : Quelques appareils de mesure utilisés sur le terrain.....	15
Figure 9 : Matériel utilisé en laboratoire.....	21
Figure 10 : Carte piézométrique minimale	27
Figure 11 : Carte piézométrique maximale.....	28
Figure 12 : Carte piézométrique moyenne.....	29
Figure 13 : Carte des fluctuations piézométriques.....	30
Figure 14 : Niveau de variations des paramètres physiques	33
Figure 15 : Variation spatiale des paramètres chimiques.	37
Figure 16 : Diagramme de Piper (1944) des eaux souterraines de Bertoua 1.....	38
Figure 17 : Proportion moyenne des éléments chimiques dans les eaux souterraines de la ville de Bertoua 1.	39
Figure 18 : Variation spatiale des paramètres bactériologiques de l'ouvrages P32	40
Figure 19 : Projection des variables sur le plan factoriel F	44
Figure 20 : Présentation de l'aptitude des eaux à l'irrigation d'après le diagramme	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:	Relevés climatiques moyens de Bertoua pour une période allant de 2007 à 2020	5
Tableau 2:	Points d'échantillonnage avec leurs coordonnées respectives.	17
Tableau 3:	Variation des niveaux piézométriques dans le bassin versant de Badombé (septembre 2022-fevrier 2023)	25
Tableau 4:	Variations statiques des paramètres physiques.	32
Tableau 5:	Variations statistiques des paramètres chimiques (ions majeurs).	35
Tableau 6:	Variations statistiques des paramètres chimiques (éléments traces).....	36
Tableau 7:	Variations statistiques des paramètres bactériologique dans l'ouvrage P32.....	39
Tableau 8:	Matrice de corrélation paramètres physico-chimiques	42

LISTE DES ABREVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

µeq/l : Micro équivalent par litre

TZ+ : Somme des équivalents cations majeurs

TZ- : Somme des équivalents anions majeurs

UFC : Unité formant colonies

mg/l : Milligramme par litre

OMS : Organisation mondiale de la santé

pH : Potentiel d'hydrogène

C.E : Conductivité électrique

ACP : Analyse en composante principale

ANOR : Agence des normes et de la qualité du Cameroun

BUCREP : Bureau central des recensements et des études de population

CNPE : Chaîne panafricaine nord équatoriale

BI : Balance ionique

GPS : Global positioning system

LAGE : Laboratoire d'analyse géochimie des eaux

MES : Matière en suspension

TDS : Total dissolved solid

CAMWATER : Cameroon water utilities corporation

CDE : Camerounaise des eaux

Ma : million d'années

WWRU : waste water research unit

RÉSUMÉ

Les grandes métropoles à travers le monde, et celles du Cameroun en particulier, font face à des pressions croissantes qui impactent la quantité et la qualité des ressources en eau. Cette étude a été initiée pour analyser le fonctionnement hydrodynamique et la qualité des eaux souterraines du bassin versant de Badombé, situé à l'Est du Cameroun. La méthodologie adoptée inclut une recherche bibliographique et cartographique, des investigations sur le terrain (suivi piézométrique, mesures des paramètres physico-chimiques, prélèvements d'eau réalisés en 2022) ainsi que des analyses en laboratoire (caractérisation physico-chimique et bactériologique, traitement des données via des outils statistiques, hydrochimiques et des SIG). Les résultats montrent, sur le plan hydrodynamique, que les niveaux piézométriques des 48 puits suivis varient de 623,6 m en saison des pluies à 664,5 m en saison sèche. Les fluctuations piézométriques vont de 0,39 m (puits 19) à 3,56 m (puits 14). Ces variations limitées s'expliquent par la nature argilo-sableuse des sols dans la zone non saturée, caractérisés par une faible perméabilité, ainsi que par l'importance du ruissellement, réduisant les infiltrations. Sur le plan physico-chimique, les eaux présentent une température comprise entre 22,4 °C et 22,5 °C, un pH variant de 3,4 à 9,7 (acide à basique), et une minéralisation relativement faible à importante ($58,3 \mu\text{S/cm} \leq \text{CE} \leq 857 \mu\text{S/cm}$). Deux faciès hydrochimiques principaux ont été identifiés : le faciès chloruré-sodique-potassique et le faciès bicarbonaté-sodique-potassique. Bien que la majorité des paramètres physico-chimiques respectent les normes de l'OMS et de l'ANOR, certaines concentrations en nitrates et en ammonium indiquent des pollutions de certains ouvrages. Les eaux souterraines du bassin versant de Badombé nécessitent donc un traitement préalable avant toute utilisation pour la consommation humaine. La vulnérabilité des ressources en eau dans cette zone est accentuée par la faible profondeur des nappes, leur localisation géographique, les activités socioéconomiques (agriculture et élevage), ainsi que l'insuffisance des infrastructures d'assainissement (latrines, rejets de déchets liquides et solides).

Mots clés : Est Cameroun, Zone péri-urbaine, Nappe libre, Niveau piezometrique, Qualité des eaux.

ABSTRACT

Major metropolises around the world, and those in Cameroon in particular, are facing increasing pressures that are impacting the quantity and quality of water resources. This study was initiated to analyze the hydrodynamic functioning and groundwater quality of the Badombé watershed, located in eastern Cameroon. The methodology adopted includes bibliographic and cartographic research, field investigations (piezometric monitoring, physico-chemical parameter measurements, water sampling in 2022) and laboratory analyses (physico-chemical and bacteriological characterization, data processing using statistical, hydrochemical and GIS tools). Hydrodynamically, the results show that piezometric levels in the 48 wells monitored vary from 623.6 m in the rainy season to 664.5 m in the dry season. Piezometric fluctuations range from 0.39 m (well 19) to 3.56 m (well 14). These limited variations can be explained by the clay-sand nature of the soils in the unsaturated zone, characterized by low permeability, and by the extent of runoff, reducing infiltration. Physico-chemically, the water has a temperature of between 22.4°C and 22.5°C, a pH ranging from 3.4 to 9.7 (acid to basic), and relatively low to high mineralization ($58.3 \mu\text{S/cm} \leq \text{CE} \leq 857 \mu\text{S/cm}$). Two main hydrochemical facies have been identified: chloride-sodium-potassium facies and bicarbonate-sodium-potassium facies. Although the majority of physico-chemical parameters comply with WHO and ANOR standards, some nitrate and ammonium concentrations indicate pollution from certain structures. Groundwater in the Badombé watershed therefore requires prior treatment before it can be used for human consumption. The vulnerability of water resources in this area is accentuated by the shallowness of the aquifers, their geographical location, socio-economic activities (agriculture and livestock farming), and the inadequacy of sanitation infrastructures (latrines, liquid and solid waste disposal).

Key words: East Cameroon, peri-urban area, free water table, piezometric level, water quality.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie, formant la base des écosystèmes et étant utilisée par l'homme pour diverses fins, telles que la survie, le développement industriel, l'agriculture, l'élevage, et les constructions civiles. À l'échelle mondiale, les ressources en eau douce sont majoritairement composées de glaciers (69 %), d'eaux souterraines (30,8 %) et de lacs et rivières (environ 0,2 %) (Gleick, 1996). Les eaux souterraines, étant plus protégées, sont généralement de meilleure qualité, mais leur exploitation nécessite des moyens financiers et matériels conséquents. En revanche, les eaux de surface, bien que facilement accessibles, sont plus exposées à la pollution. Cette situation préoccupante a retenu l'attention des organismes internationaux et a été au centre des discussions lors de la dernière Conférence des Nations Unies sur l'eau, tenue en mars 2023 à New York.

En Afrique centrale, et plus particulièrement au Cameroun, l'accès à l'eau potable demeure un problème majeur dans les grandes métropoles. La ville de Bertoua, chef-lieu de la plus vaste région du pays, n'est pas épargnée. Face à une population croissante, les habitants de cette localité rencontrent des difficultés d'approvisionnement en eau potable en raison de plusieurs facteurs : l'extension limitée du réseau de distribution, la méconnaissance des potentialités des eaux souterraines et des eaux de surface (aquifères et cours d'eau), la croissance démographique rapide, la forte pression exercée sur les ressources disponibles, l'insuffisance des systèmes d'assainissement pluvial et individuel (notamment les latrines à fond perdu), la pollution de l'eau, ainsi que les événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondations) exacerbés par le changement climatique et la perte de biodiversité. Confronté à cette problématique préoccupante, l'État, à travers la CAMWATER, ne parvient à couvrir qu'environ 40 % de la demande en eau potable dans les centres urbains où elle est présente (Nono *et al.*, 2009), ce qui ne répond pas aux attentes des populations. Dans les zones rurales, plusieurs programmes hydrauliques ont permis la réalisation de forages pour faciliter l'accès à l'eau potable des populations locales. Malgré ces efforts, le nombre moyen d'habitants à approvisionner en eau potable reste encore élevé, ce qui pousse une grande partie de la population à se tourner vers les puits, les sources et les cours d'eau dont la qualité est souvent douteuse. Ces sources d'approvisionnement peuvent avoir des effets délétères sur la santé des populations, entraînant des maladies telles que la fièvre typhoïde, l'amibiase, le paludisme et bien d'autres (WHO, 2017).

Pour une évaluation qualitative et quantitative plus précise des ressources en eau dans la zone d'étude et ses environs, plusieurs recherches ont été menées ces dernières années en hydrologie, hydrodynamique, hydrogéologie et hydrogéochimie. Parmi celles-ci, on peut citer les travaux de Kouassy Kalédjé *et al.* (2020) sur le bassin versant de la Kadey, ainsi que ceux de Menti Agbor Nelson *et al.* (2023) sur certains points d'eau de la ville de Bertoua. Les études de Rakotondrabe *et al.* (2017) sur le Lom à Bétaré Oya méritent également d'être mentionnées. Les résultats obtenus révèlent que le chimisme des eaux dans ces différentes zones est fortement influencé par la nature de la lithologie qu'elles traversent, ainsi que par les activités anthropiques (mines, déforestation, urbanisation, etc.). Il est à noter que ces recherches, pour la plupart effectuées en périphérie, ne prennent pas simultanément en compte les aspects hydrodynamiques, hydrogéochimiques et bactériologiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif principal est d'analyser le fonctionnement hydrodynamique et d'évaluer la qualité des eaux souterraines du bassin versant de Badombé, situé dans la région de l'Est-Cameroun.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- analyser les fluctuations piézométriques de l'aquifère du bassin versant de Badombé ;
- déterminer les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines de ce bassin ;
- identifier les facteurs influençant les ressources en eau souterraines du bassin en lien avec l'écosystème de ce bassin ;

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré comme suit :

- le premier chapitre aborde les généralités sur la zone d'étude et les travaux antérieurs ;
- le deuxième chapitre décrit le matériel et les méthodes utilisés pour obtenir les résultats ;
- le troisième chapitre présente les résultats obtenus sur le terrain et en laboratoire, ainsi que la discussion et l'interprétation de ces résultats.

Le mémoire inclut également une introduction générale et se termine par une conclusion générale accompagnée de perspectives.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE ET TRAVAUX ANTERIEURS

INTRODUCTION

Ce chapitre vise à situer la zone d'étude dans son contexte naturel et humain. Il aborde les caractéristiques physiques, notamment le climat, la végétation, l'orohydrographie et la géologie, ainsi que les aspects humains tels que la population et les activités socioéconomiques. En complément, il présente un aperçu des travaux antérieurs réalisés dans la zone et ses environs.

I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1. Situation géographique et administrative

La zone d'étude est située dans de région l'Est Cameroun, département de Lom et Djérem, arrondissement de Bertoua I. Sur le plan géographique, elle est comprise entre les méridiens 13°40' et 13°44' Est et les parallèles 4°33' et 4°37' Nord et couvre une superficie de 136,21 Km². La ville de Bertoua I est limité au Nord par l'arrondissement de Belabo et la localité Ngofi, à l'ouest par les arrondissements Diang, à l'Est par l'arrondissement de Bertoua II et au Sud par le département du Haut Nyong (Figure 1).

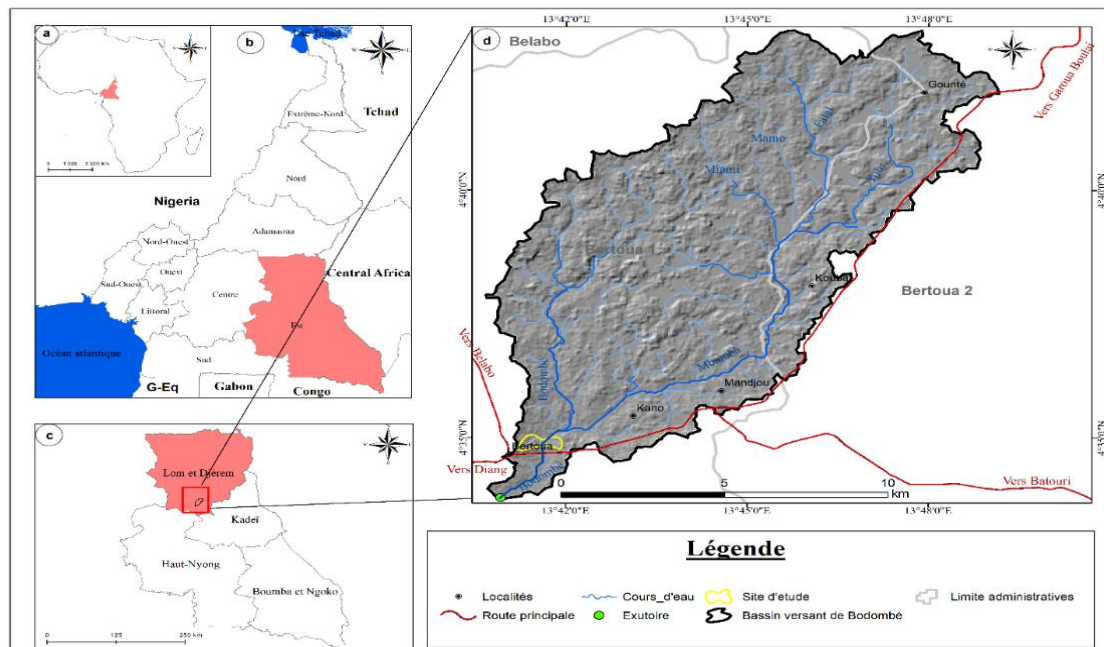


Figure 1: Localisation géographique (Extraite de la carte topographique de Bertoua et image SRTM N°f03-n004e013) : a) Carte du Cameroun dans l'Afrique ; b) Région de l'Est au Cameroun ; c) la zone d'étude dans le département du Lom et Djérem; d) Bassin versant de Badombé dans l'arrondissement de Bertoua I.

I.1.2. Contexte climatique

Les données recueillies à la station météorologique de l'aéroport de Bertoua ont permis de caractériser le climat de la zone d'étude. Les paramètres pris en compte ici sont les précipitations et les températures.

I.1.2.1. Précipitation

Les pluies annuelles enregistrées durant la période comprise entre 2007 à 2020 (14 ans) à la station météorologique de la base aérienne de Bertoua montrent que, le mois d'octobre a été le plus pluvieux avec des précipitations de 261,75 mm de pluie tandis que le mois de janvier le plus moins pluvieux avec des précipitations de 12,47 mm. La précipitation moyenne interannuelle est de 1411,20 mm (Tableau 1).

I.1.2.2. Température

La température moyenne mensuelle interannuelle est de 24,4°C pour la période allant de 2007 à 2020. Le mois le moins chaud est celui de décembre 23,65°C et le mois de mars est le plus chaud avec 26,02°C (Tableau 1).

I.1.2.3. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)

L'analyse du diagramme ombrothermique est obtenu à partir des données pluviométriques et thermiques. Ce dernier permet de ressortir proprement les mois secs et les mois humides. D'après ce diagramme, le secteur d'étude est soumis à un régime climatique à deux saisons (Figure 2) :

- Une grande saison des pluies allant mars à novembre (9 mois) ;
- Une grande saison sèche de décembre à février (3 mois).

I.1.2.4. Indice d'aridité de Martonne

L'indice d'aridité de Martonne (1972), noté I_a est un paramètre qui permet de séparer les mois secs des mois humides pendant une période donnée. Sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$I_a = 12 \times P_m / T_m + 10$$

Avec P_m = Précipitations moyennes mensuelles ; T_m = Température moyenne mensuelle ; I_a = Indice d'aridité de De Martonne.

D'après De Martonne : (i) $I_a < 20$, le mois est dit sec ; (ii) si $20 < I_a < 50$, le mois est dit sub-sec ; (iii) $I_a > 50$, le mois est dit humide

Pendant la période d'étude, il ressort que dans la région de l'Est les mois de décembre, janvier et février sont considérés comme secs, les mois de mars, avril, juin, juillet et novembre sont dits sub-secs tandis que les mois de mai, aout, septembre et octobre sont dits humides. Cet indice est d'autant plus bas que le climat est aride (Tableau 1).

Tableau 1: Relevés climatiques moyens de Bertoua pour une période allant de 2007 à 2020 (14 ans).

Mois	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy	Total
Precipitations (mm)	12,47	44,66	94,34	132,04	153,7	138	123,41	142,92	214,6	261,75	81,22	12,56	/	1411,20
Températures (°C)	23,66	25,36	26,02	23,67	25,15	24,10	23,68	23,74	24,42	24,53	24,46	23,65	24,40	/
Ia	4,45	15,16	31,43	47,06	52,47	48,39	43,97	50,83	74,82	90,96	28,28	4,48	41,02	/

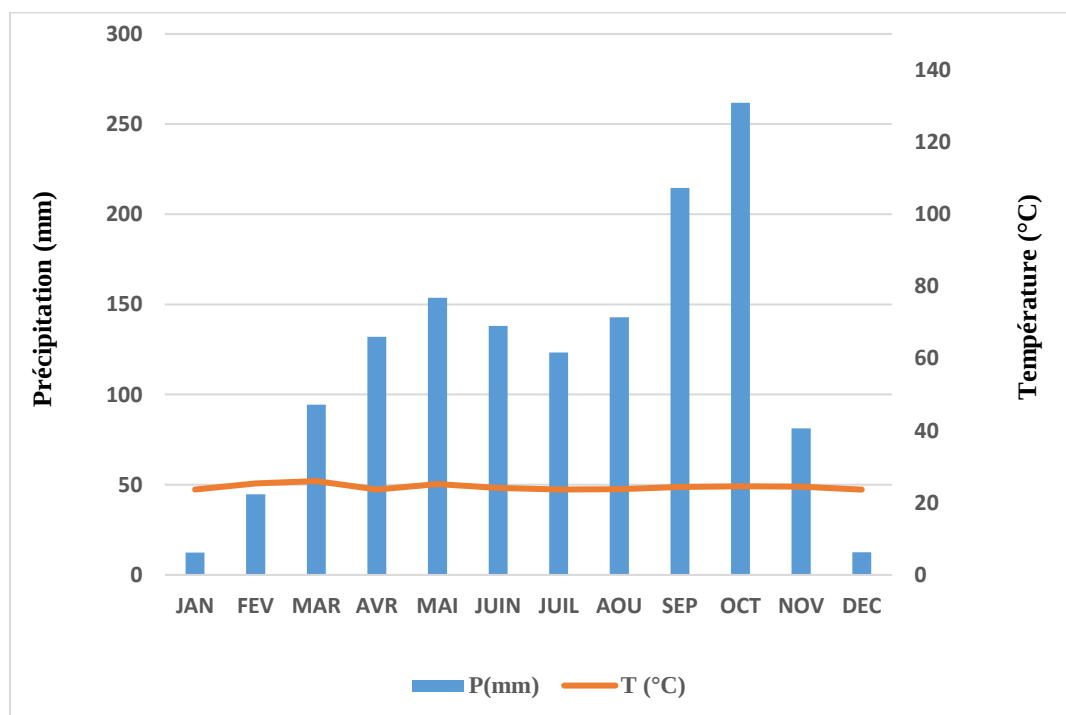


Figure 2: Diagramme ombrothermique à la station de Bertoua aéroport (2007 à 2020)

I.1.3. Végétation et faune

La zone d'étude est située en plein cœur de la zone forestière de l'Est-Cameroun qui est caractérisée par une forêt dense et humide en relation avec le climat ci-dessus. La végétation présente deux aspects :

- (i) une forêt primaire (Criaud, 1985) à sous-bois pauvre et difficile d'accès. Elle abrite une végétation herbeuse et des arbres de tailles et formes diverses de 10 m à 15 m de hauteur ;
- (ii) une forêt secondaire causée par les activités anthropiques et contenant des arbustes, les bambous de chine et les lianes. Ces deux types de végétations sont en régression continue en raison d'une déforestation quotidienne croissante due à l'augmentation de la population. Il ne reste en général que les arbres fruitiers (manguier, avocatier, papayer, goyavier, safoutier, palmiers, etc.). On rencontre également les cultures vivrières (manioc, maïs, bananes, etc.).

Les espèces fauniques rencontrées dans le secteur d'étude sont : pangolins, vipères, rats, silures, carpes, tilapias, chèvres, bœufs, chiens et hérissons.

I.1.4. Orohydrographie

I.1.4.1. Orographie

Le bassin versant de Badombé appartient au plateau sud camerounais d'altitude moyenne 600 à 850 m (Kamgang Beyala, 1998). Cette zone présente un relief à faible pente, relativement plat et modéré avec quelques ondulations. Les observations faites sur le terrain couplées aux analyses des cartes topographiques et du bloc diagramme permettent de distinguer trois unités géomorphologiques (figure 3) :

- l'unité morphologique de basse altitude (642 - 678 m) qu'on trouve dans la partie amont bassin versant allant de l'exutoire à la localité de Mandjou. Cette unité est constituée en majorité des zones marécageuses et abrite également le site d'étude ;
- l'unité morphologique d'altitude intermédiaire (679- 717 m) qui représente environ 30% du bassin versant et est marquée par la présence abondante des buttes cuirassées ;
- l'unité morphologique haute altitude (718 - 775m) qui couvre la partie Nord et Ouest de la ville de Bertoua. Cette unité correspond aux collines d'altitudes diverses.

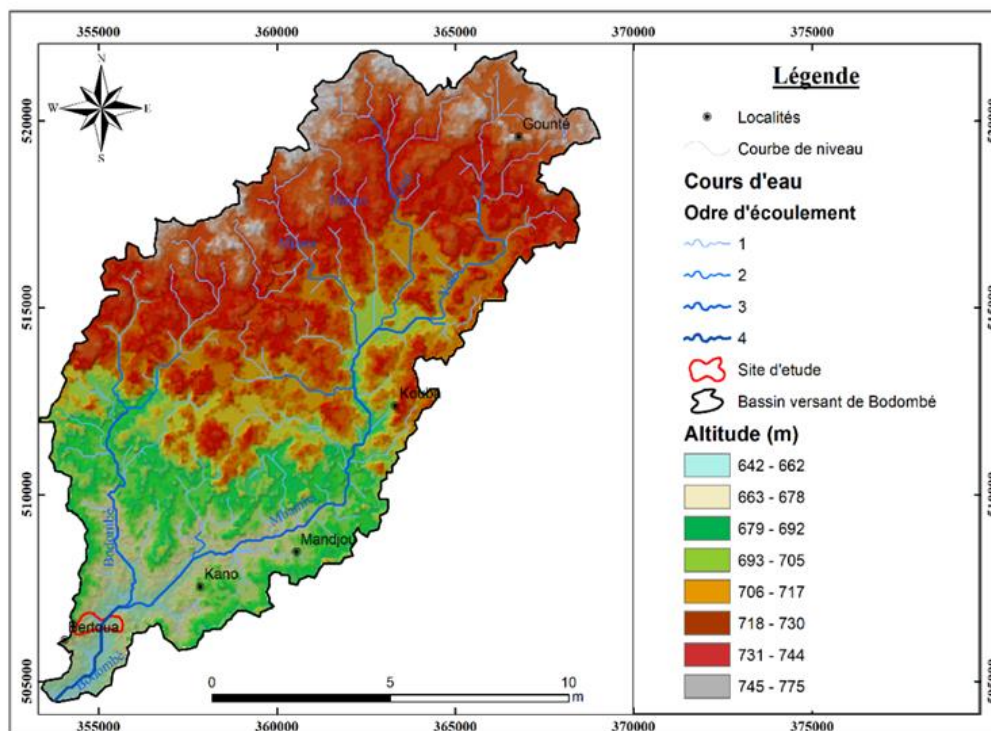


Figure 3: Bloc diagramme du bassin versant Badombé (image SRTM N°f03-n004e013).

I.1.4.2. Hydrographie

La zone d'étude est caractérisée par un réseau hydrographique dense et dendritique constituée des cours d'eau d'ordre 1,2,3 et 4 orientés majoritairement NE-SW à NW-SE. Les cours d'eau Miami, Mamo, Fatal et Yobi constituent les principaux affluents de la Mbamba, qui traverse la partie Est du bassin versant avant de se jeter et grossir le fleuve Badombé au sud vers l'exutoire (Figure 4). Le fleuve Bodombé est lui-même un affluent du Ntel, le Ntel est affluent de Zoé ou Djo qui a son tour se déverse dans la Doume. Il circule en partie péniblement au milieu d'une végétation herbeuse qui fait obstruction à leur écoulement normal. L'intensité de drainage est élevée à cause de la grande humidité du climat et la faible perméabilité des sols.

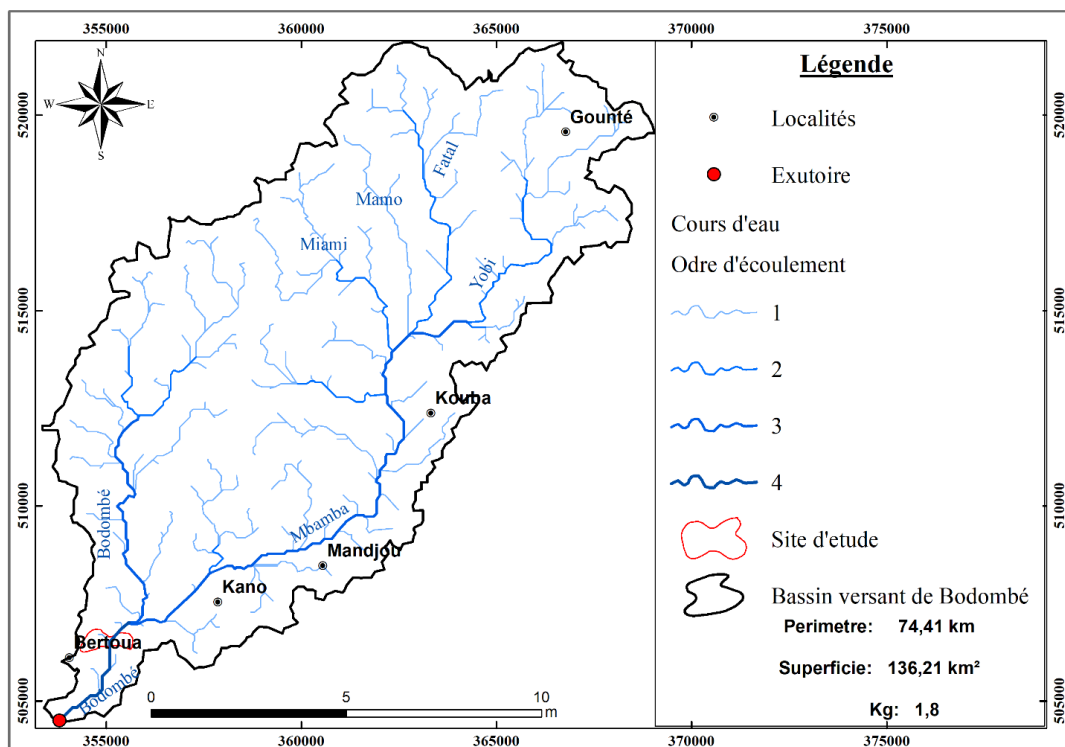


Figure 4: Carte hydrographique du secteur d'étude. (Extraite image SRTM N°f03-n004e013)

I.1.5. Géologie

I.1.5.1. Substratum géologique

Le bassin versant de Bodombé appartient à la Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale (Penaye *et al.*, 2006) ou Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (Nzenti *et al.*, 1988). Cette chaîne comporte trois grands domaines géodynamiques distincts (Nzenti *et al.*, 2011). Ces domaines sont : (1) un domaine Nord ; (2) un domaine Centre ; (3) un domaine Sud. Ce bassin versant appartient au deuxième domaine, sa géologie est principalement constituée des roches méta-volcaniques, des roches méta-sédimentaire et des granites intrusifs de la série du Lom (Kankeu *et al.*, 2009). Les couches géologiques observées comprennent les gneiss migmatiques, les granodiorites, les granites et leucogranites (qui couvrent plus de 80% du bassin versant). Ces formations sont caractérisées par des micaschistes, des schistes, des orthogneiss, des conglomérats et des granites post-tectoniques ainsi que les quartzites recoupés par les granitoïdes panafricains (Soba, 1989). On observe également de nombreuses zones de cisaillement panafricaines qui ont favorisé la formation d'abondantes intrusions syn-cinématiques (Nzenti *et al.*, 2006). Ce bassin est réputé pour ses minéralisations aurifères et

d'autres gisements de minéraux économiquement rentables d'origines granitique tels que molybdène (Mo), le plomb (Pb), et le bismuth (Bi) (Freyssinet *et al.*, 1989, Toteu *et al.*, 2001).

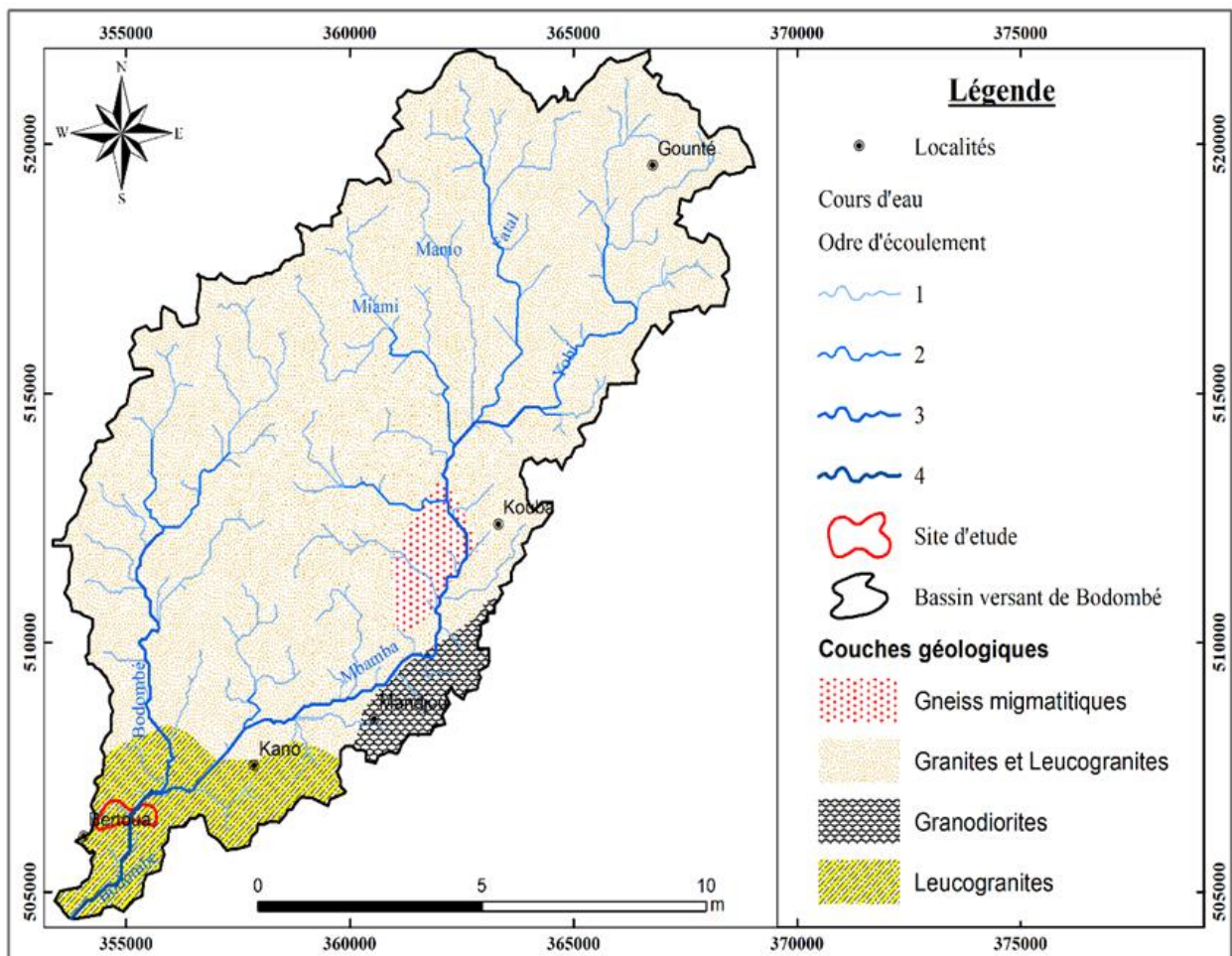


Figure 5: Carte géologique de du bassin versant de Badombé. (Extraite de la carte géologique du cameroun à 1/200000, Feuille Bertoua (NB-33-II))

I.1.5.2. Pédologie

Le Plateau sud camerounais, domaine auquel appartient le bassin versant de Bodombé est constituée de trois principaux types de sols (Nyack, 1988 ; Kamgang Kabeyene Beyala, 1998) : les sols ferralitiques, sols hydromorphes et les sols peux évolués. La couverture pédologique de la zone d'étude est constituée d'épaisse couche de sols ferralitiques rouges et jaunes. Ces derniers se trouvent au niveau des interfluves et présentent une richesse en oxydes de fer et en oxydes d'alumine. Les sols hydromorphes de couleur grise sont très riches en éléments minéraux et généralement rencontrés dans les bas-fonds représentant ainsi que les marécages. La partie supérieure du profil pédologique est de couleur foncée indiquant l'abondance de matières organiques (Segalen, 1967).

I.1.6. Cadre humain

I.1.6.1. Population

Les études démographiques récentes menées par Institut Nationale de Statistique (INS, 2019) montrent que la population de la région de l'Est à laquelle appartient l'actuelle zone d'étude connaît une forte croissance d'environ 3,5%. Cette augmentation est marquée par l'exode rural et un taux de natalité élevé. Cette population est passée de 835 642 habitants en 2015 à 855 745 habitants en 2019. La ville de Bertoua, chef-lieu de la région l'Est et représentant la zone d'étude est la localité originelle des Kaka, des Baya, des Yanguéré. Les allochtones peuplant la ville de Bertoua sont constitués des Bamilékés (37,58%), des Fang-Béti (20%), des Maka, des originaires du Grand Nord, etc. (Mintedem, 1985).

I.1.6.2. Activités socioéconomiques

Les principaux secteurs d'activités dans cette région sont : l'agriculture, le petit élevage, le commerce, et l'exploitation minière ainsi que l'exploitation du bois. Ces activités étant prépondérantes, sont pratiquées essentiellement par les allochtones. Les fonctions administratives sont principalement occupées par les halogènes. La population locale pratique les cultures de rente à échelle réduit comme le café et le cacao qui sont la plupart du temps exportées vers le marché extérieur. L'on y pratique également des cultures vivrières pour la consommation locale. Il s'agit du manioc, du maïs, des arachides. La pisciculture et l'élevage du petit bétail y sont aussi pratiqués

I.2. QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS EFFECTUES DANS LA ZONE D'ETUDE ET SES ENVIRONS

La ville de Bertoua et ses environs ont été le siège de nombreux travaux antérieurs qui ont portés sur la géologie, la qualité des eaux, l'hydrodynamique.

En géologie, les travaux de Soba *et al.*, (1991) ; Ngako *et al.*, 2003 ; Kankeu *et al.*, (2009) ; Toteu *et al.*, (2022) révèlent que cette zone représente le socle paleoproterozoïque qui s'est transformé au cours de l'orogénèse panafricaine. Ce socle est caractérisé d'une part par l'abondance des granitoïdes calcoalcalins syn- à post-tectoniques, mises en place entre 660 Ma et 580 Ma, et d'autre part par des roches métavolcaniques et métasédimentaires de faible à moyen degré métamorphique (schistes à séricite et chlorite, quartzites) formant le bassin du Lom. Par ailleurs, Olivry., (1986) met en exergue la présence de deux types de sols : les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes.

Cependant, les études réalisées en hydrogéochimie dans la ville de Bertoua notamment celles de Menti Agbor *et al.* (2023) montrent que les échantillons d'eau étaient acides avec 94% de pH inférieurs à 6,5. La conductivité électrique variait de 21 à 776 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les matières totales dissoutes (TDS) oscillaient entre 8,5 à 388 mg/l. L'abondance relative des ions majeurs (meq/l) était $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ pour les cations et $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^-$ pour les anions. Deux facies dominants ont été dégagés, Ca-Cl et CaHCO_3 permettant de dire que ces eaux sont chlorurée calcique et bicarbonaté calcique. Les travaux de Kouassy Kalédjé *et al.*, (2016) ; Ratotondrabe *et al.*, (2017) se sont intéressés aux effets des activités minières sur l'environnement dans la région de l'Est Cameroun. Il ressort de ces études que les sols et les eaux sont pollués par les métaux lourds.

En hydrodynamique, les travaux effectués par effectués par Kouassy Kalédjé *et al.*, (2019) sur l'évaluation quantitative des ressources en eaux par la méthode hydrologique dans le bassin versant de la Kadey ont porté sur les mécanismes de recharge de la nappe, la transmissivité, la profondeur des forages et leurs débits. Ces études ont permis de trouver la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer pour recharger les nappes qui est de 107,4 mm, soit 7,51% des précipitations.

CONCLUSION

Le bassin versant d'étude est situé dans la ville de Bertoua, Chef-lieu la région de l'Est-Cameroun et du département du Lom et Djérem. Le climat qui y règne est de type équatorial à deux saisons inégalement réparties (7 mois de pluies et 5 mois de sécheresse) avec une hauteur de pluie interannuelle de 1411,20 mm. La végétation est en régression continue et fortement dégradée sous l'influence de l'urbanisation. Le cours d'eau Badombé est grossi par son affluent principal la Mbamba avant de se jeter dans le Ntel. La géologie de la zone est dominée par un ensemble essentiellement granito-gneissique dont l'altération conduit à la formation des sols ferralitiques rouges, jaunes au niveau des versants et hydromorphes dans les bas-fonds. La population de Bertoua suit une croissance démographique exponentielle causée en partie par l'exode rural. Plusieurs groupes ethniques ont été rencontré dans la zone à savoir les Gbaya, les Yanguéré, les kaka, et quelques expatriés. Cette population hétérogène exerce les métiers comme L'agriculture, l'élevage, la maçonnerie, le commerce, l'exploitation forestière et minière.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

INTRODUCTION

Pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ce travail, les travaux ont été menés aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Ce chapitre présente les matériels et les différentes méthodes utilisés

II.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE ET CARTOGRAPHIQUE

Tout travail de recherche commence par la revue de la littérature en relation avec la thématique à développer. Dans le cadre de ce mémoire, il a été fait une synthèse des travaux sur les ouvrages scientifiques (les articles, les mémoires, les thèses) de la région en générale et de la zone d'étude en particulier a été effectuée. La recherche bibliographique s'est poursuivie avec l'acquisition des cartes, notamment les cartes topographiques de Bertoua (feuille NB33 III 2c ; l'échelle 1/50 000) et géologiques. Cette étape s'est poursuivie par l'obtention des données sur les pluies et les températures et enfin elle a aussi orienté les choix du site d'étude qui prend en compte les localités Tindamba et Ekombitié.

II.2. TRAVAUX DE TERRAIN

Les travaux de terrain ont consisté à la reconnaissance du site d'étude, au choix et au suivi des ouvrages hydrauliques ainsi que leur description, aux prélèvements et aux conditionnements des échantillons d'eau souterraines pour le laboratoire.

II.2.1. Reconnaissance du site d'étude

Pour mener à bien cette étude, des campagnes de terrains ont été organisés entre septembre 2022 et février 2023. Celles-ci ont permis d'avoir une vue générale sur le travail à effectuer, les difficultés à traverser et même se familiariser avec le terrain ainsi que localiser géographiquement le site d'étude. Cette reconnaissance a également permis de recenser les ouvrages hydrauliques (puits) ainsi que les cours d'eau présents dans la zone d'étude. A l'issue de cette étape, une méthodologie d'investigation efficace sur le terrain a été élaborée.

II.2.2. Présentation du site d'étude

Les localités de Tindamba et Ekombitié sont situées dans l'arrondissement de Bertoua I, département du Lom-et-Djérem, dans la région de l'Est-Cameroun. Ces deux localités se trouvent au sein du bassin versant du Badombé, qui constitue un espace hydrologique d'intérêt pour les investigations de terrain. Le relief de ces deux localités est modéré marqué par une succession de collines basses et de vallées marécageuses, avec des altitudes variantes

approximativement entre 642 et 778 m. Le cours d'eau Badombé, d'ordre 3, prend sa source dans les zones forestières environnantes et s'écoule en direction NE-SW, drainant un réseau hydrographique dense et ramifié. Ce réseau est enrichi par plusieurs affluents temporaires et permanents qui se jettent en rive gauche et en rive droite, alimentant ainsi le système hydrologique global du bassin (Figure 6).

Le cours d'eau Badombé subit des modifications anthropiques croissantes. Les activités agricoles non maîtrisées, la construction de petites infrastructures hydrauliques (buses, ponceaux) et l'absence d'entretien des zones marécageuses contribuent à des problèmes tels que l'engorgement du lit mineur, les inondations périodiques et l'ensablement. Ces phénomènes nécessitent des investigations plus poussées pour proposer des stratégies de gestion durable du bassin.

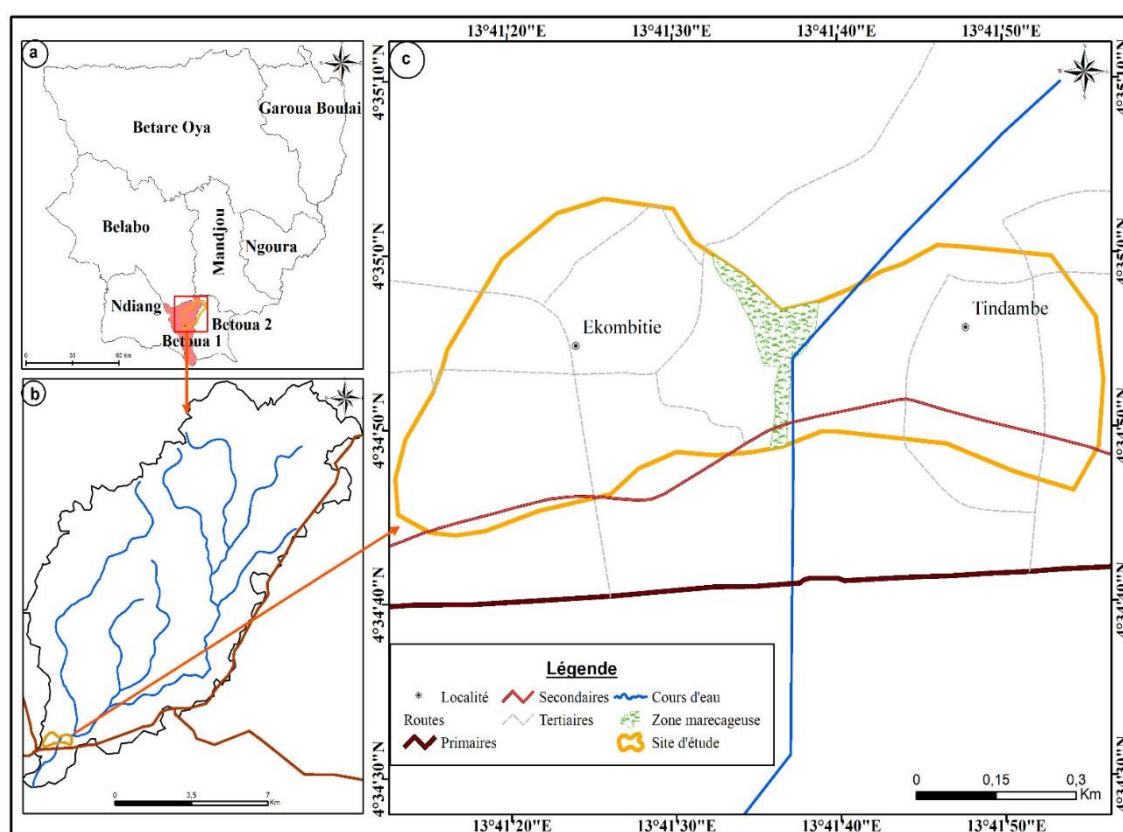


Figure 6 : Localisation du site d'étude ; a) arrondissement de Bertoua 1 dans le département du Lom et Djérem ; b) site d'étude dans le bassin versant de Badombé c) localités Ekombitie et Tindamba.

II.2.3. Choix et description des points suivis et prélevés

Le cours d'eau et les ouvrages hydrauliques retenus pour les suivis piézométrique et d'échantillonnage des eaux ont été choisis selon les critères ci-dessous

- le type d'eau souterraine (puits) ;
- l'accessibilité facile et l'accord des propriétaires des ouvrages ;
- le taux de sollicitation et la densité des populations autour de l'ouvrage pour évaluer l'influence anthropique ;
- le type de formation traversée par ces eaux pour évaluer l'influence de la lithologie.

À cet effet, quarante-huit (48) ouvrages hydrauliques ont été choisis pour cette étude et ont fait l'objet d'un suivi piézométrique mensuel entre les périodes de septembre 2022 à février 2023 (figure 6). Les coordonnées géographiques de ces ouvrages ont été collectés à l'aide d'un GPS (Global Positionning System) de marque Garmin. (Figure 7).

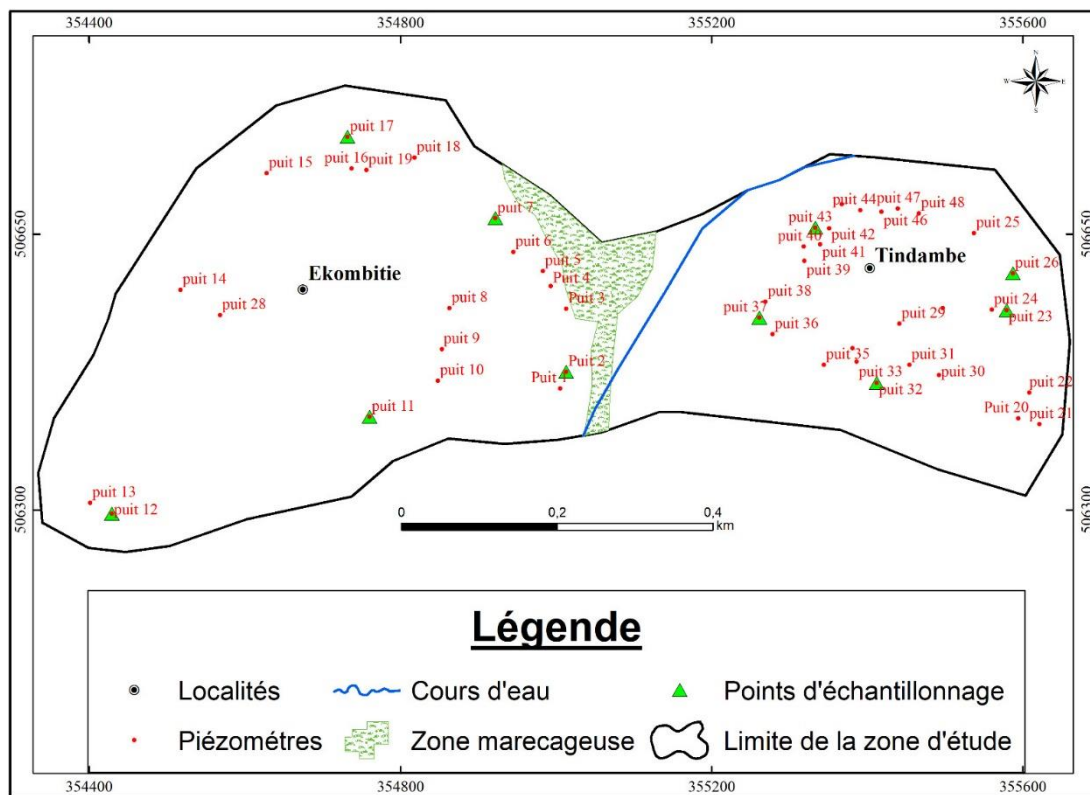


Figure 7 : Carte d'échantillonnage

II.2.4. Suivi piézométrique

La piézométrie est la mesure de la profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine dans un ouvrage hydraulique. En effet Castany (1998) souligne que la surface piézométrique mesurée, constitue la limite supérieure de la nappe qui est le plus souvent en perpétuelle fluctuation. Cette surface piézométrique peut s'élever ou s'affaisser librement dans la formation hydrogéologique perméable.

Le suivi piézométrique a été réalisé dans 48 ouvrages (puits) suivant une fréquence mensuelle sur une période de 6 mois allant de septembre 2022 à février 2023. Ce travail avait pour but de mesurer la profondeur du plan d'eau dans les puits à l'aide d'une sonde sonore électrique et à voyant lumineux de marque Solinst. Une fois cette profondeur obtenue, le niveau piézométrique est calculé à partir de la côte du puits obtenue grâce à un récepteur GPS à partir de la formule suivante : $H = Z - P$

Avec : Z = altitude de la surface topographique (en m) ;

P = niveau statique (en m).

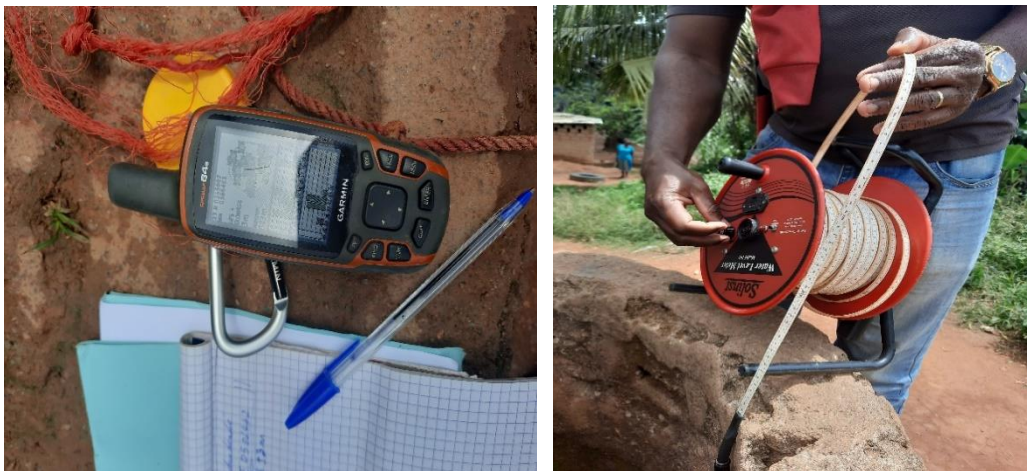


Figure 8 : Quelques appareils de mesure utilisés sur le terrain

II.2.5. Prélèvement et conditionnement des échantillons d'eau

Les prélèvements ont été effectués le 28 février 2023 sur dix (10) points d'eau différents et repartis sur le site d'étude pour les analyses physico-chimique et un échantillon pour les analyses bactériologiques (Tableau 2). Les échantillons ont été prélevés et remplis à ras bord dans les bouteilles en plastiques préalablement lavées au savon ensuite à l'eau distillée et rincées à l'eau à analyser. Les échantillons destinés à l'analyse des paramètres physico-chimiques sont étiquetés puis acheminés au Laboratoire d'Analyse Géochimique d'Eaux de Nkolbisson (LAGE) à Yaoundé.

Une fois les prélèvements des échantillons effectués, ils ont subi in situ la mesure de la température à l'aide d'un thermomètre de précision $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les autres paramètres tels que pH, température à 25°C en laboratoire, conductivité électrique, les MES, alcalinité, TDS, oxygène dissout, turbidité, salinité, les cations et anions majeurs ainsi que quelques éléments traces ont été mesurés au laboratoire.

L'échantillon d'eau retenu pour analyse bactériologique a été conservé dans un flacon en verre préalablement stérilisé à l'étuve. Contrairement aux précédents, ici le flacon est rempli de façon à laisser un volume d'air d'environ 1/10ème pour que les bactéries puissent respirer ; et ensuite étiqueté. Enfin, l'échantillon est conservé dans une glacière avec des glaçons pour empêcher la multiplication des bactéries. Cet échantillon est ensuite transporté avant 24 heures au laboratoire de Waste Water Research Unit (WWRU) du Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé I.

Tableau 2: Points d'échantillonnage avec leurs coordonnées respectives.

Points de prélèvements	Types d'ouvrage	Localités	Longitude	Latitude	Altitudes (m)	Description des Points de prélèvements
P2	Puits	Ekombitié	E0506475	N0355013	655	Puits sans couvercle muni d'une margelle en pneu situé à proximité d'une décharge et d'un marécage.
P7			E0506670	N0354922	653	Puits à ciel ouvert situé au milieu d'une cours et en bordure d'une route non bitumée.
P11			E0506418	N0354760	670	Puits aménagé avec couvercle situé au milieu d'une concession et à quelques mètres des latrines
P12			E0506295	N0354429	676	Puits aménagé avec margelle en parpaings et sans couvercle.
P17			E0506733	N0354737	665	Puits aménagé sans couvercle avec une margelle d'environ 30 cm situé à moins de 10m des latrines.
P23		Tindamba	E0506449	N0355608	668	Puits aménagé sans couvercle situé au pieds des arbres fruitiers
P26			E0506651	N0355537	665	Puits aménagé situé à proximité d'une décharge.
P32			E0506484	N0355454	665	Puits avec margelle en pneu de camion situé à 3 m des latrines
P37			E0506523	N0355278	652	Puits avec margelle en fut situé en bas des arbres fruitiers
P43			E0506637	N0355339	652	Puits muni d'une margelle en pneu situé au milieu d'une cours

II.3. TRAVAUX DE LABORATOIRE

Les travaux de laboratoire ont consisté à la mesure des paramètres physiques, au traitement et conditionnement des échantillons d'eau, ensuite à l'analyse des paramètres chimiques et bactériologiques des échantillons, et enfin au traitement des résultats obtenus.

II.3.1. Mesure des paramètres physiques en laboratoire

Cette mesure a été rendu possible grâce à un Multi-paramètre, Les paramètres physico-chimiques pris en compte dans la présente étude sont : le potentiel d'hydrogène (pH), la température de l'eau (T en °C), la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$) et le solide dissout total (TDS en mg/l), la salinité, l'oxygène dissout (en mg /l), l'alcalinité ($\mu\text{Mol}/\text{l}$), les matières en suspension (mg/l), la turbidité (NTU). La mesure de ces paramètres est réalisée par introduction direct des électrodes dans un récipient contenant de l'échantillon.

Le pH et la température se mesurent en plongeant dans le récipient contenant 100 ml de l'eau d'échantillonnage, l'électrode du pH-mètre de marque WTW LF325 couplé à une électrode de marque SENTEX 41.00. Ces électrodes étant préalablement étalonnées avec une solution tampon de pH compris entre 4,00 et 7,00 à 25°C puis conservées dans une solution de chlorure de potassium (KCl) de 3mol/L. La précision des mesures est de $\pm 0,01$ unité de pH.

Pour ce qui est des matières en suspension, elles ont été évaluées après filtration des échantillons et représentent la différence de poids entre le filtre chargé et le filtre vierge ramenée au volume filtré. La conductivité électrique a été mesuré suivant le même protocole décrit ci-dessus par un conductimètre de marque WTW conduct 3110.

II.3.2. Analyse des paramètres chimiques

Dans le cadre de ce travail, les éléments chimiques pris en compte sont les cations majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) et les anions majeurs (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})

II.3.2.1. Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+)

L'analyse des cations majeurs est réalisée à l'aide d'un chromatographe de type DIONEX ICS-90 au Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) à Nkolbisson. Après filtration, l'échantillon est acidifié jusqu'à un pH de 2 pour éviter d'éventuelles précipitations. Deux gouttes d'oxyde de lanthane III sont ajoutées pour éliminer les interférences dues aux autres éléments. Les résultats apparus sur l'écran d'ordinateur sont transformés en teneur. La précision de l'analyse est de 5%. Cette méthode est basée sur le temps de rétention au travers d'une colonne de résine échangeuse d'ions. Le suivi de la conductivité

de la solution, au cours du temps, constitue le chromatogramme. Ce dernier est alors comparé à celui des étalons utilisés.

II.3.2.2. Anions majeurs (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-})

Les anions majeurs sont analysés par chromatographie ionique HPLC (High Performance Liquid Chromatography), sur Dionex ICS-100 au Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) à Nkolbisson. La précision des mesures est de 5%.

Les concentrations des bicarbonates (HCO_3^-) et des carbonates (CO_3^{2-}) en solution sont déterminées par la mesure de l'alcalinité généralement exprimées en méq/l. Comme dans les eaux naturelles de la zone tropicale du sud Cameroun, les ions carbonates sont pratiquement absents (ils ne commencent à apparaître que pour des pH supérieurs à 9), on peut donc assimiler l'alcalinité à la concentration des seuls bicarbonates, et elle est exprimée en mg HCO_3^-/l . L'alcalinité est ainsi mesurée par dosage titrimétrie de 100 ml de l'échantillon brut par une solution d'HCl de 0,02N jusqu'à un pH de 3. Le volume équivalent (V_e) est obtenu par la méthode graphique développée par Gran, (1952). On a alors :

Alcalinité ($\mu\text{mol/L}$) = $(\text{Ca} \cdot V_e) / V_o$; avec : Ca (μmol) = normalité d'acide, V_o (en litre) : volume initial de l'échantillon.

II.3.2.3. Eléments en trace (F^- , PO_4^{3-} et NH_4^+)

L'analyse des éléments traces a été réalisée à l'aide d'un chromatographe de type DIONEX ICS-90 au Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) à Nkolbisson. Après filtration, l'échantillon est acidifié jusqu'à un pH de 2 pour éviter d'éventuelles précipitations.

II.3.2.4. Balance Ionique (BI)

La balance ionique permet de vérifier la fiabilité des résultats des analyses. Elle permet de vérifier également si une eau est équilibrée ou pas. En effet, dans une eau bien tamponnée où l'analyse est bien faite, la TZ^+ est sensiblement égale à la TZ^- (Abdoulkadri *et al.*, 2015). Le calcul de ces erreurs traduit le degré de neutralité électrique des ions en solution (Ndam Ngoupayou, 1997). Elle est donnée par l'expression :

$$\text{BI} = ((\text{TZ}^+ - \text{TZ}^-) / (\text{TZ}^+ + \text{TZ}^-)) * 100$$

La marge d'erreur admise varie de 5% pour les eaux dont la somme des cations ou des anions est supérieure à 30 méq/l et de 10% pour celles dont elle est inférieure à 1 méq/l (Ndam Ngoupayou, 1997).

II.3.3. Analyse des paramètres bactériologiques

L'analyse bactériologique d'une eau permet de rechercher les bactéries pathogènes, d'évaluer les risques de contamination par ces bactéries et de contrôler l'efficacité des traitements des eaux (Rodier, 1996). Deux types de paramètres bactériologiques ont été analysés au laboratoire Wasterwater Research Unit du Département de Biologie et Physiologie

Végétale de l'Université de Yaoundé 1. Il s'agit notamment des streptocoques fécaux (SF), et des coliformes fécaux (CF). La méthode utilisée est « la colorimétrie sur membrane filtrante ».

II.3.3.1. Protocole et principe de mesure

Après avoir préparé la gélose, on la conserve. En zone stérile, on la coule dans des boîtes de pétri stériles petit diamètre dont le couvercle est laissé à moitié ouvert pour permettre le refroidissement et la solidification de celle-ci. Lorsque la gélose est solidifiée, on procède (après avoir stérilisé et conservé dans le papier aluminium le système de filtration) à la filtration de 20 ml d'eau sur une membrane (de maille 0,45µm) qui est mise en culture sur gélose nutritive puis, on ferme la boîte qu'on place à l'incubateur, gélose vers le haut. Après incubation pendant 24 heures à des températures de 37 puis 44°C, les colonies comptées sont exprimées en UFC (Unité Formatrice de Colonies) pour 100 ml d'eau. Le principe de la mesure est le même pour tous les germes, à la seule différence que pour les streptocoques on utilise un support nutritif contenant des substances inhibitrices qui empêchent le développement de tous les germes autres que les colonies de streptocoques. La lecture et la confirmation des colonies typiques identifiées : les colonies bleues pour les coliformes fécaux, les colonies à reflets verts métalliques pour les coliformes totaux et les colonies rouges à roses pour les entérocoques et enfin le dénombrement des colonies reconnues sur membranes quadrillées.

II.3.3.2. Matériel utilisé

Le matériel utilisé est constitué d'une balance à haute précision ; d'un four Pasteur ; d'une enceinte thermo statée à 37°C ± 1°C ; d'un Bec Benson ; des boîtes de pétri stériles petit diamètre ; des pipettes 1 ml (à usage unique), des flacons et des membranes ; w< stériles ; d'une pompe à vide ; de la gélose au tergitol 7 ; de l'eau distillée et d'un microscope.



Figure 9 : Matériel utilisé en laboratoire

II.3.4. Méthode de traitement des données

Dans le but de comprendre l'hydrodynamisme et le chimisme des eaux du secteur d'étude, différentes méthodes ont été employées pour le traitement des données. Il s'agit des méthodes d'interpolation des données piézométriques, hydrochimiques, et statistiques.

II.3.4.1. Méthode d'interpolation des données piézométriques

Pour la réalisation du comportement hydrodynamique de l'aquifère, et des fonctions captives et conductrices du réservoir (Castany, 1998), trois méthodes sont souvent utilisées pour tracer les courbes d'iso valeurs : la méthode d'interpolation des données piézométriques par des programmes informatiques, la méthode d'interpolation approximative des niveaux piézométriques, la méthode d'interpolation des triangles.

La méthode d'interpolation des données piézométriques par des programmes informatiques a été utilisée parce qu'elle donne une meilleure interpolation. Les programmes informatiques qui ont servis à la réalisation des cartes sont les logiciels ArcGIS 10.8 et SURFER 16, par la méthode de Krigeage.

II.3.4.2. Méthode hydrochimique

Le diagramme de Piper (1944) est l'outil utilisé pour la classification hydrogéochimique des eaux souterraines dans la présente étude. Il est plus fréquemment utilisé dans le domaine de l'hydrochimie pour déterminer les différents faciès hydrochimiques. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques (Anaba Onana, 2017).

II.3.4.3. Méthode statistique

L'Analyse Statistique Multivariée (ASM) est une méthode couramment utilisée dans le domaine des sciences de l'eau et donne des résultats très satisfaisants (Yao *et al.*, 2012 ; Mfonka *et al.*, 2015). Cette méthode de traitement des données utilisée est la statistique descriptive qui est basée sur l'analyse des caractéristiques descriptives des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Elle concerne les valeurs extrêmes (minimum et maximum), la valeur centrale (moyenne), la médiane, etc (Kouassi *et al.*, 2010). En effet, des histogrammes de fréquence ont été réalisés à l'aide du logiciel Excel 2016 pour l'illustration. Ensuite des analyses statistiques multivariées telles que la matrice de corrélation (MC) et l'analyse en composante principale (ACP) ont été réalisées. Ces analyses statistiques ont été rendues possible par le logiciel XLSTAT 2018 mis à disposition sur le site www.xlstat.com.

❖ Matrice de Corrélation (MC)

La matrice de corrélation est élaborée à partir des coefficients calculés pour chaque paire de variables, ce qui permet d'identifier les associations entre elles. Cela aide à évaluer la cohérence globale de l'ensemble des données (Everitt et Horthorn, 2011).

❖ Analyse en Composante Principale (ACP)

C'est une méthode d'analyse statistique multivariée qui permet de simplifier les données et d'identifier des modèles au sein de grands ensembles de données (Matiatos *et al.*, 2014 ; Mfonka *et al.*, 2015 ; Rakotondrabe *et al.*, 2017b). Cette simplification s'effectue en transformant les données en un nouvel ensemble de variables, appelé composantes principales, qui résultent de combinaisons linéaires des variables d'origine. Ces composantes sont ensuite classées de manière à ce que les deux ou trois premières expliquent la majorité des variations des données originales (Matiatos *et al.*, 2014 ; Rakotondrabe *et al.*, 2017).

CONCLUSION

Le site retenu pour la présente étude est l'arrondissement Bertoua I du département de Lom et Djérem situé à l'Est-Cameroun. En plus d'une intense recherche documentaire et cartographique, l'approche méthodologique adoptée a consisté aux travaux de terrain basés sur la reconnaissance et le recensement des ouvrages hydrauliques, les prélèvements et conditionnements des échantillons d'eaux souterraines durant l'année 2023. En somme, quarante-huit puits ont fait l'objet des suivis piézométriques mensuels sur une période de six mois en tenant compte des variations saisonnières et dix échantillons ont été choisis pour les analyses physico-chimiques ainsi qu'un échantillon pour l'analyse bactériologique. Ensuite, ces échantillons ont été acheminés au laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) de Yaoundé pour évaluer les paramètres physico-chimiques et au laboratoire Wastewater Research Unit (WRU) du département de Biologie et Physiologie Végétale de l'Université de Yaoundé I, pour les paramètres bactériologiques (CF et SF). Les résultats issus de ces analyses ont été traités puis analysés à l'aide des outils statistiques hydrochimiques et des SIG (ArcGIS 10.8 et Surfer 16) au laboratoire de Géosciences des formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé 1.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Ce chapitre est basé sur l'interprétation et la discussion différents résultats liés aux données piézométriques ainsi qu'aux caractéristiques physicochimiques et bactériologiques des eaux souterraines de la zone d'étude.

III.1. CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFÈRE

Elle consiste à comprendre le fonctionnement hydrodynamique des eaux souterraines à travers les résultats de la piézométrie.

III.1.1. Données piézométriques

L'analyse des données piézométriques obtenues durant la période d'étude considérée montre que les niveaux piézométriques varient entre 623,6 m et 667,71 m avec une moyenne de 653,8 m (Tableau 3). L'évolution des niveaux piézométriques mensuels en fonction des pluies pour la période choisie indique que, le mois d'octobre représente la période des hautes eaux en raison de la recharge de la nappe lors des pluies tandis que le mois de février est le mois des basses eaux à cause de la sécheresse intense. Les plus bas niveaux piézométriques sont observés dans le puits 34. Ils varient entre 623,59 m et 624,85 m avec un niveau piézométrique moyen de 624,14 m. Alors que les niveaux piézométriques les plus élevés sont obtenus dans le puits 14 ; ils varient de 664,15 m à 667,71 m pour un niveau piézométrique moyen de 666,5 m (Tableau 3).

Les fluctuations mensuelles des puits suivis varient de 0,39 m pour le puit 19 à 3,56 m pour le puit 14, avec une fluctuation piézométrique moyenne de 1,2 m (tableau 3). Dans l'ensemble des 48 puits étudiés, les fluctuations piézométriques demeurent faibles. Ces faibles fluctuations sont attribuées à la nature des sols dans la zone non saturée et principalement argilo-sableux, présentant des perméabilités relativement faibles. Les fortes fluctuations des niveaux d'eau souterraine observées dans les puits 14 et 9 sont liées à la densité des populations autour de ces puits. On remarque ces résultats sont supérieurs à ceux rapportés par Kouassy Kaledje (2007) à Ngaoundéré (0,59 à 1,97 m), ainsi que ceux d'Eyong (2013) dans la localité de l'Akée (0,14 à 0,97 m), mais inférieurs aux résultats obtenus par Kengni Derrick (2023) à Mbankomo, avec des fluctuations allant de 0,56 à 11,72 m, et proches des travaux de Abderaman (2023) à N'Djamena, soit de 0,31 à 2,54 m

Tableau 3: Variation des niveaux piézométriques dans le bassin versant de Badombé
(septembre 2022-fevrier 2023)

Puits	X	Y	Z	NP min.(m)	NP max.(m)	NP moy.(m)	H (m)	N
Puits 1	E0506454	N0355005	665	661,87	662,5	662,173333	0,63	6
Puits 2	E0506475	N0355013	655	653,97	654,75	654,428333	0,78	6
Puits 3	E0506555	N0355013	658	657	657,61	657,275	0,61	6
Puits 4	E0506584	N0354993	658	656,71	657,17	656,871667	0,46	6
puits 5	E0506603	N0354983	661	659,28	659,84	659,515	0,56	6
puits 6	E0506627	N0354945	655	652,28	652,82	652,506667	0,54	6
puits 7	E0506670	N0354922	653	651,58	652,11	651,808333	0,53	6
puits 8	E0506556	N0354863	657	647,785	648,925	648,266667	1,14	6
puits 9	E0506504	N0354853	662	652,62	654,55	653,658333	1,93	6
puits 10	E0506464	N0354848	665	655	656,68	655,948333	1,68	6
puits 11	E0506418	N0354760	670	657,32	658,87	658,213333	1,55	6
puits 12	E0506295	N0354429	676	664,58	666,38	665,743333	1,8	6
puits 13	E0506309	N0354401	670	660,04	661,31	660,761667	1,27	6
puits 14	E0506579	N0354517	673	664,15	667,71	666,495	3,56	6
puits 15	E0506727	N0354628	663	657,63	658,75	658,198333	1,12	6
puits 16	E0506733	N0354737	665	660,3	661,01	660,653333	0,71	6
puits 17	E0506773	N0354732	668	662,88	664,02	663,488333	1,14	6
puits 18	E0506747	N0354818	654	652,84	653,42	653,118333	0,58	6
puits 19	E0506731	N0354756	661	658,145	658,535	658,345	0,39	6
Puits 20	E0506416	N0355594	663	654,46	656,18	655,356667	1,72	6
puits 21	E0506409	N0355621	660	651,89	653,67	652,77	1,78	6
puits 22	E0506449	N0355608	668	658,98	660,54	659,93	1,56	6
puits 23	E0506553	N0355579	667	660,08	661,56	660,67	1,48	6
puits 24	E0506554	N0355560	658	651,44	653,36	652,405	1,92	6
puits 25	E0506651	N0355537	665	657,1	658,63	657,741667	1,53	6
puits 26	E0506600	N0355587	668	657,9	658,83	658,401667	0,93	6
puits 27	E0506556	N0355497	657	652,42	653,75	652,993333	1,33	6
puits 28	E0506547	N0354568	658	651,79	652,85	652,271667	1,06	6
puits 29	E0506536	N0355441	657	649,52	650,47	649,908333	0,95	6
puits 30	E0506471	N0355492	655	645,86	646,98	646,41	1,12	6
puits 31	E0506484	N0355454	665	655,7	656,83	656,298333	1,13	6

puits 32	E0506461	N0355412	658	649,68	650,93	650,31	1,25	6
puits 33	E0506488	N0355386	658	649,29	650,47	649,791667	1,18	6
puits 34	E0506505	N0355381	632	623,595	624,855	624,141667	1,26	6
puits 35	E0506484	N0355344	650	642,91	643,93	643,376667	1,02	6
puits 36	E0506523	N0355278	652	646,53	647,48	646,93	0,95	6
puits 37	E0506544	N0355261	648	643,25	644,26	643,691667	1,01	6
puits 38	E0506564	N0355269	651	646,08	647,1	646,525	1,02	6
puits 39	E0506616	N0355319	646	640,77	641,88	641,266667	1,11	6
puits 40	E0506634	N0355318	646	641,45	642,57	641,956667	1,12	6
puits 41	E0506637	N0355339	652	648,58	649,75	649,121667	1,17	6
puits 42	E0506657	N0355351	651	648,29	649,49	648,848333	1,2	6
puits 43	E0506658	N0355333	646	642,85	644,02	643,381667	1,17	6
puits 44	E0506688	N0355367	647	645,23	646,52	645,85	1,29	6
puits 45	E0506680	N0355391	654	650,02	651,24	650,576667	1,22	6
puits 46	E0506678	N0355418	654	648,58	649,79	649,075	1,21	6
puits 47	E0506682	N0355439	657	651,73	653,02	652,281667	1,29	6
puits 48	E0506676	N0355466	669	663,05	664,29	663,61	1,24	6

III.1.2. Cartes piézométriques

Dans le but de comprendre le comportement hydrodynamique de l'aquifère libre du site d'étude, des cartes piézométriques minimales, moyennes, maximales, ainsi qu'une carte des fluctuations de la surface piézométrique a été élaborées. L'objectif de ces cartes est de déterminer les directions de l'écoulement souterrain et les zones d'alimentation de la nappe, conformément à la méthodologie de Ngouh *et al.*, (2020). L'analyse des cartes révèle un écoulement non uniforme des eaux souterraines caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit divergentes soit convergentes (Figures 10 et 11).

L'analyse des courbes hydro-isohypses se concentre sur la courbure des arcs de cercle. Les zones localisées dans les localités Ekombitié et Tindamba du site d'étude marquées par la présence des courbes fermées, elliptiques ou circulaires plus ou moins régulières avec des lignes de courant divergentes, correspondent à des dômes piézométriques ou des zones de drainage général. Contrairement à la zone quadrillée au sud de Tindamba qui est caractérisée par des lignes de courant convergentes et délimitée par des arcs de cercle concave orientés vers l'aval, correspond à une dépression piézométrique. Elle est propice à l'installation d'ouvrages de captage (figures 10,11,12).

La carte des fluctuations piézométriques a été réalisée à partir de la différence d'altitude entre les données piézométriques minimales et maximales (Figure 13). Cette dernière montre des fluctuations importantes dans les piézomètres situés à proximité des localités Ekombitié et Tindamba. Ces fortes fluctuations peuvent s'expliquer par la sollicitation et la densité de la population autour de ces ouvrages. Dans l'ensemble, les fluctuations piézométriques restent faibles dans la quasi-totalité des ouvrages étudiés.

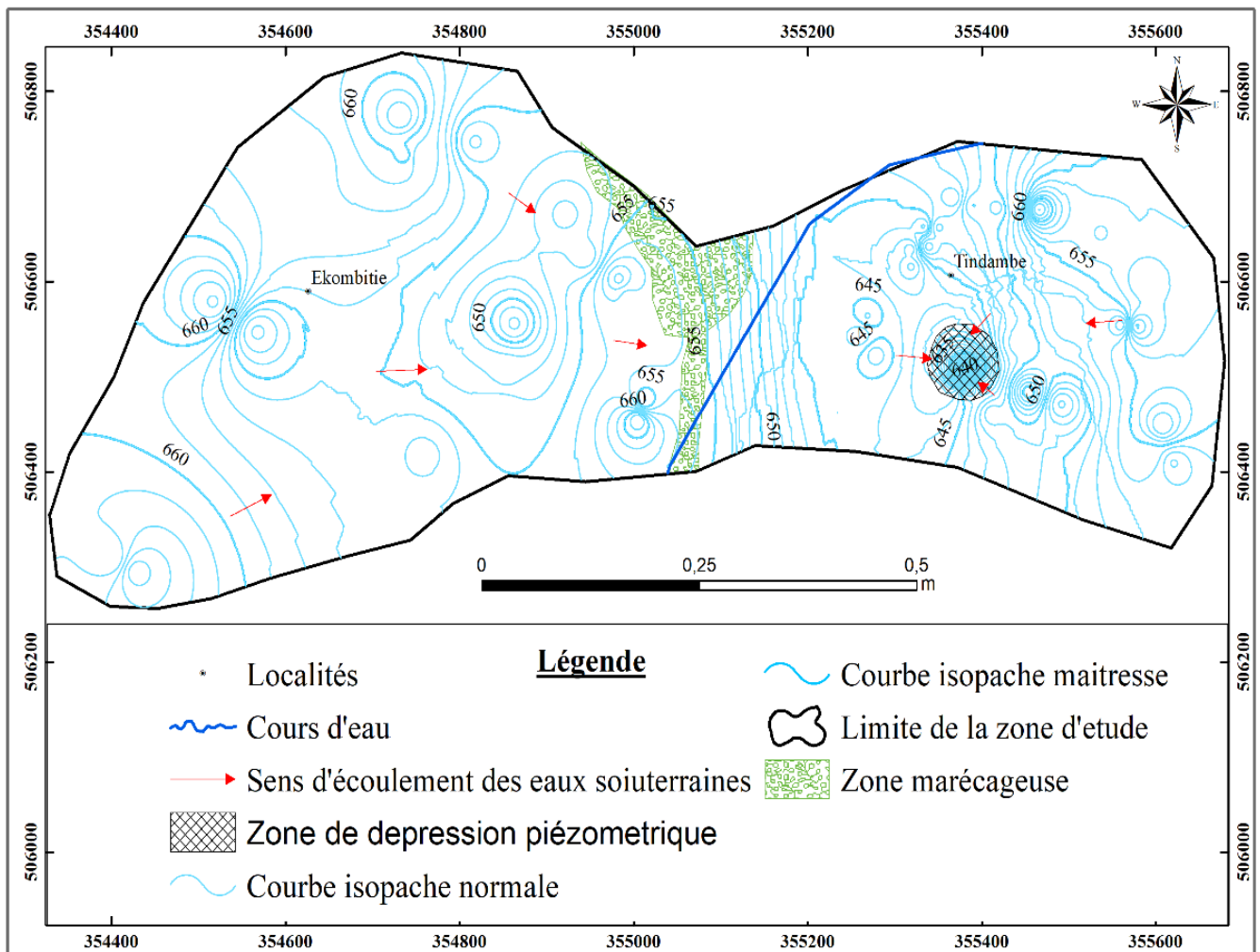


Figure 10 : Carte piézométrique minimale

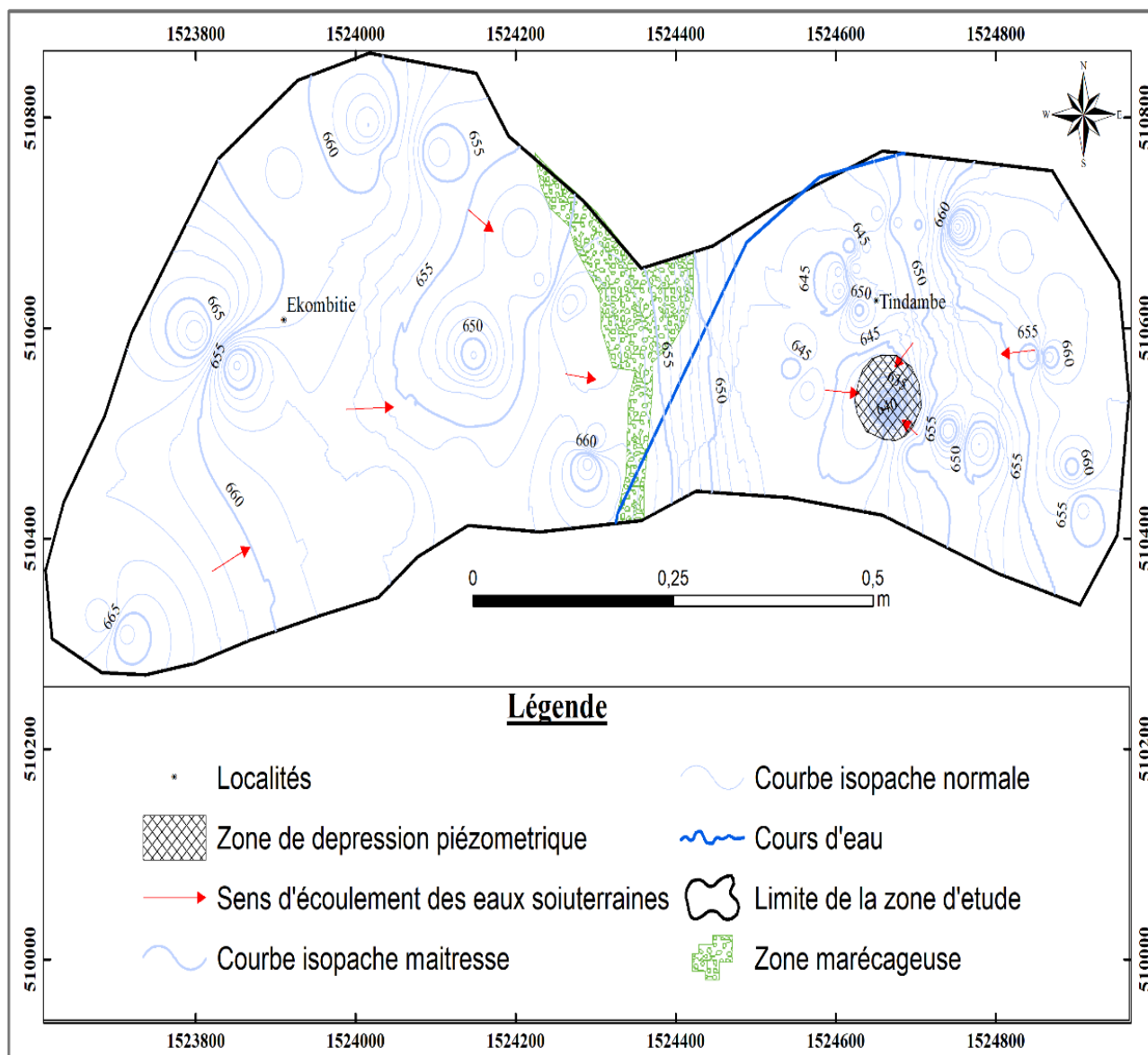


Figure 11 : Carte piézométrique maximale

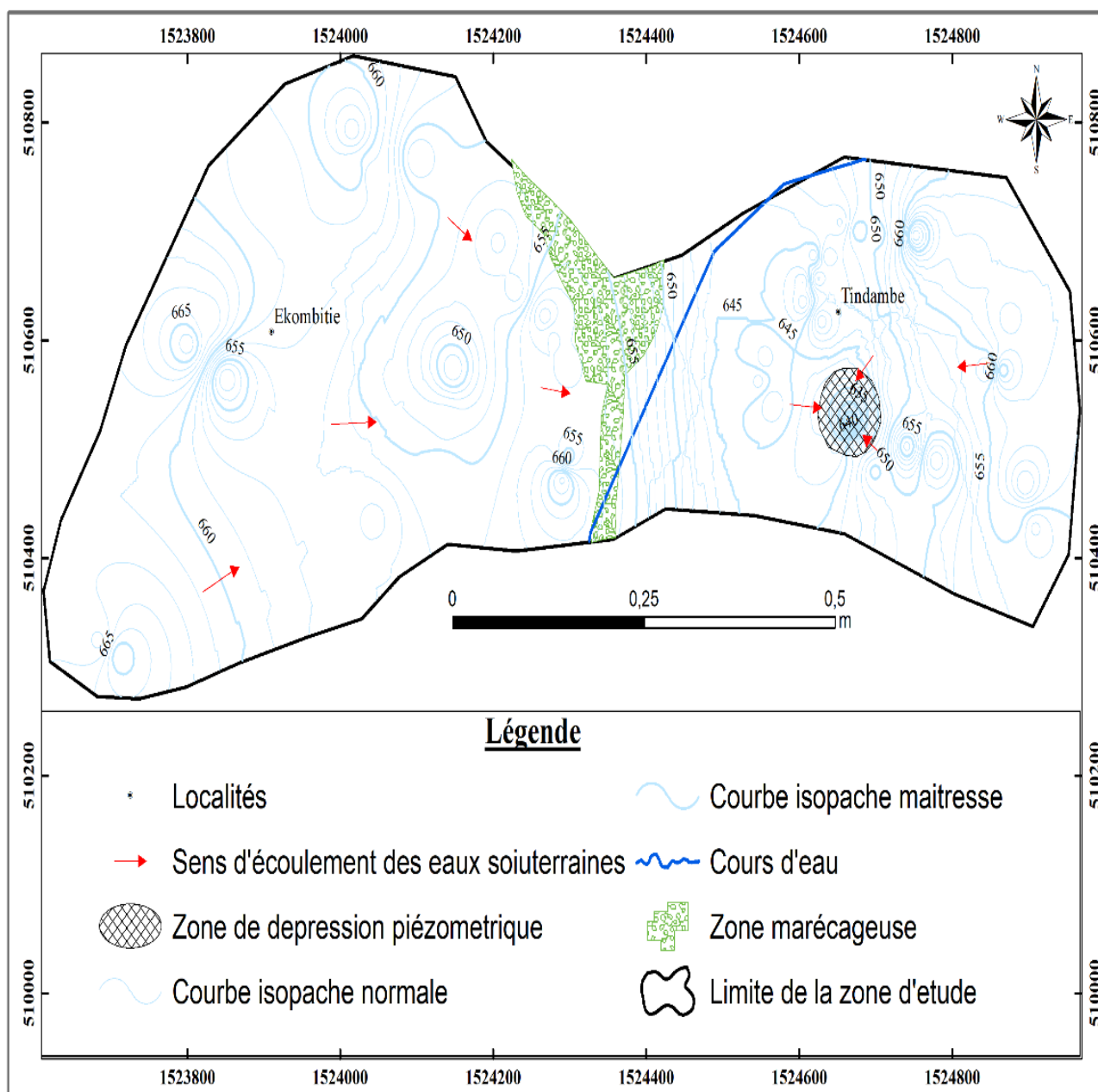


Figure 12 : Carte piézométrique moyenne

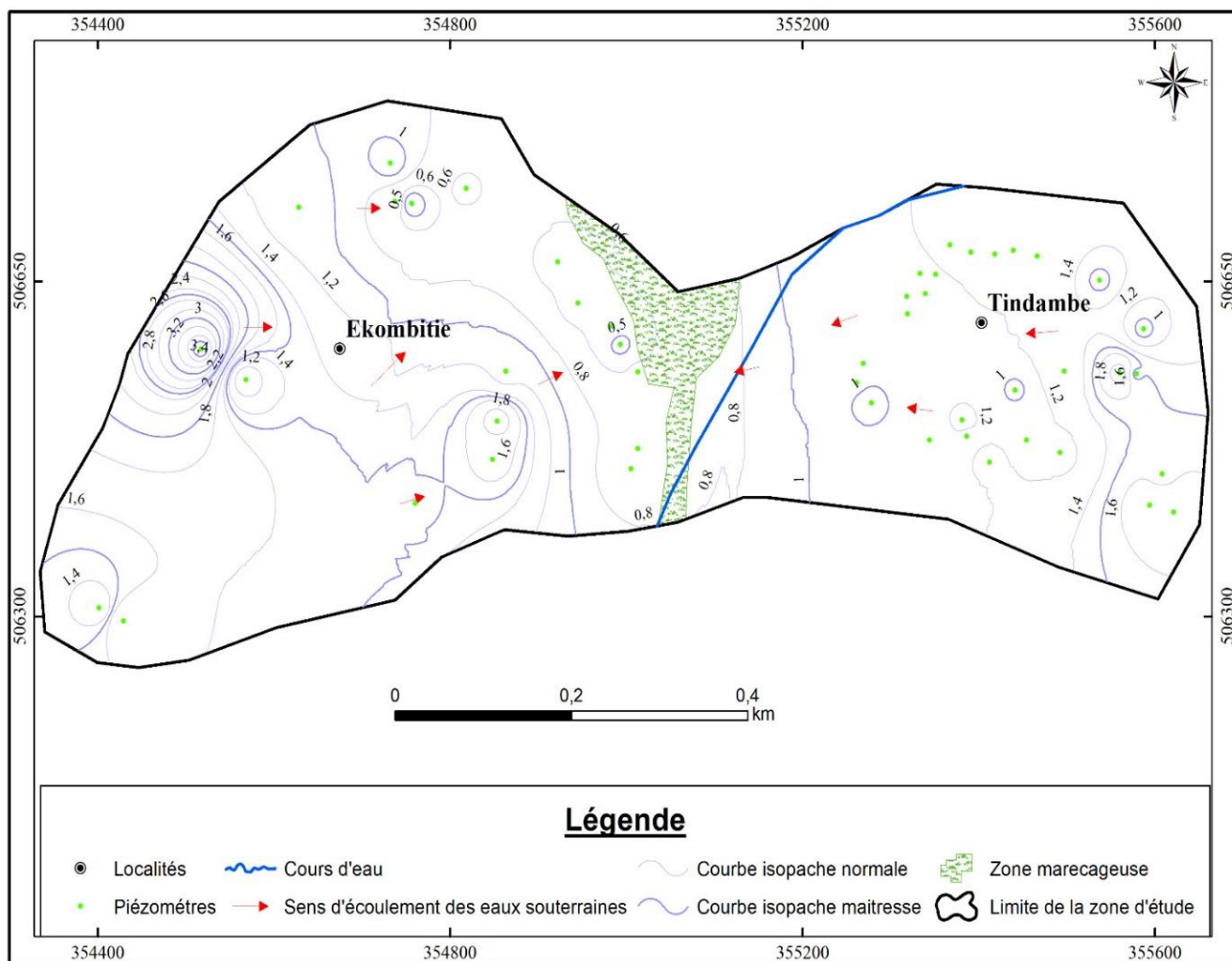


Figure 13 : Carte des fluctuations piézométriques

III.2. QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DE L'ACQUIFERE

III.2.1. Variation spatio-temporelle des paramètres physiques

Les paramètres physico-chimiques considérés dans le cadre de cette étude englobent la température (T), le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), le total des solutés dissous (TDS), la matière en suspension (MES), et la turbidité.

III.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs de pH des échantillons analysés du bassin versant varient entre 3,4 et 9,7 pour les puits P26 et P17, respectivement avec une moyenne arithmétique de 5,29 et une médiane de 5,25 (Tableau 4, Figure 14). Ces eaux présentent un caractère acide, attribuable à plusieurs facteurs : la nature silicatée prédominante des roches sous-jacentes (orthogneiss et granitoïdes), le type de sol dans la zone, l'oxydation de la matière organique produisant du CO_2

et entraînant ainsi une baisse du potentiel d'hydrogène (Matsindjou Djoumessi, 2004), les pluies acides (Rakatondrabe *et al.*, 2017 ; Bon *et al.*, 2021b). Les résultats obtenus concordent avec ceux rapportés par Menti Agbor *et al.*, (2023) à Bertoua. La plupart des valeurs de pH mesurées dans le site d'étude ne se situent pas dans les plages recommandées par l'OMS (6,5 à 8,5) et l'UE (6,5 à 9). Toutes ces eaux fortement acides (pH inférieur à 6,5) sont déconseillées à la consommation.

III.2.1.2. Température

Les températures des eaux dans la zone d'étude varient entre 22,4°C et 22,7°C, avec une moyenne arithmétique de 22,5°C (voir Tableau 4, Figure 14). Les échantillons P32, P12, et P43 présentent les températures les plus basses, tandis que l'échantillon P26 affiche la température la plus élevée. Ces valeurs mesurées se rapprochent de la température moyenne de l'atmosphère à Bertoua, établie à 24,04°C, suggérant une relation thermique entre l'aquifère et l'atmosphère dans la région.

Les températures relevées demeurent en deçà du seuil de 25°C recommandé par les normes internationales telles que définies par l'OMS, l'ANOR et l'UE pour les eaux destinées à la consommation. Ainsi, le bassin versant de Bodombé présente des valeurs inférieures au seuil, les rendant acceptables du point de vue des critères de qualité. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Rakotondrabe *et al.*, 2017 à Bétaré-Oya, inférieur à ceux rapportés par Menti Agbor *et al.*, (2023) dans la ville de Bertoua, ainsi que Kouassy Kaledje (2007) dans le Nord-ouest de Ngaoundéré.

III.2.1.3. Conductivité électrique (CE).

La conductivité électrique dans le site d'étude est comprise entre 58,3 et 857 µS/cm, avec une moyenne de 327,99 µS/cm et une médiane de 214,2 µS/cm (Tableau 4). Une valeur élevée est observée à l'échantillon P32, tandis qu'une valeur plus faible est enregistrée à P17. Ce paramètre fournit une indication rapide et approximative de la minéralisation totale de l'eau et permet de suivre son évolution (Rodier *et al.*, 2009). Selon la classification de Detay (1993) (Annexe 5), ces eaux présentent une faible minéralisation et sont conformes aux normes de OMS.

III.2.1.4. Total dissolved solid (TDS)

La TDS du bassin versant étudié varie entre 32,65 et 585 mg/L, avec une moyenne arithmétique de 223,42 mg/L et une médiane de 146,25 mg/L (Tableau 4). Ce paramètre reflète

la concentration totale des sels inorganiques présents en solution dans l'eau. Les résultats de la TDS se situent dans la plage recommandée par l'OMS.

III.2.1.5. Turbidité

La turbidité des eaux du bassin versant oscille entre 4,4 et 7,9 NTU, avec une moyenne arithmétique et une médiane de 5,66 et 5,27 NTU respectivement (Tableau 4). L'échantillon P2 présente une faible turbidité, tandis que l'échantillon P26 affiche une valeur élevée. Dans l'ensemble, ces valeurs dépassent les normes établies par l'OMS. Les concentrations élevées de turbidité pourraient être expliquées par la contamination externe par des aérosols, les mouvements des algues et micro-organismes et l'accumulation des boues au fond des puits. Ces valeurs de turbidité dépassent celles observées par Abderaman (2023) dans la ville de N'Djamena. Cela souligne la nécessité d'identifier et de contrôler les sources de contamination afin de réduire la turbidité des eaux, assurant ainsi la conformité aux normes de qualité de l'eau établies par l'OMS.

III.2.1.6. Matière en suspension (MES)

Les MES (Matières En Suspension) présentent une variation entre 1,7 et 4,4 mg/L, avec une moyenne de 3,06 mg/L et une médiane de 3,3 mg/L (Tableau 4). Une concentration élevée de MES est observée à l'échantillon P32, tandis qu'une concentration plus faible est enregistrée à P17. La présence de matières en suspension provient principalement des apports directs des eaux de ruissellement résultant des précipitations, ainsi que de la forte sollicitation des ouvrages d'eau par les populations riveraines pendant la saison sèche.

Les échantillons analysés présentent des valeurs de MES supérieures à la norme de l'OMS, ce qui préconise une absence totale de MES dans les eaux destinées à la consommation.

Tableau 4: Variation statique des paramètres physiques.

Paramètres	pH	T	CE	TDS	Turbidité	MES
Unités		°C	μS/cm	mg/l	NTU	mg/l
N	10	10	10	10	10	10
Min	3,434	22,4	58,3	32,65	4,4	1,7
Max	9,709	22,7	857	585	7,97	4,4
Moy	5,29	22,5	327,99	223,42	5,66	3,06
Med	5,25	22,5	214,2	146,25	5,27	3,3

Légende : **pH** : Potentielle d'hydrogène ; **T** : Température ; **CE** : Conductivité électrique ; **TDS** : Total dissolve solide ; **MES** : matière en suspension ; **N** : Nombre ; **Min** : Minimum ; **Max** : Maximum ; **Moy** : Moyenne ; **Med** : Médiane

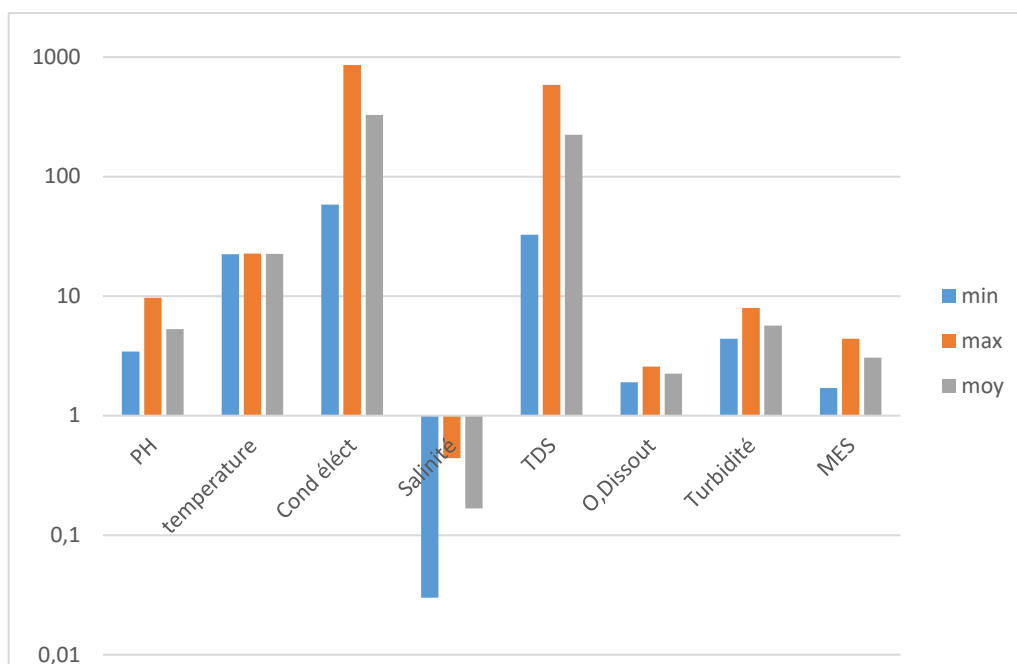


Figure 14 : Niveau de variations des paramètres physiques

III.2.2. Variation spatiale des paramètres chimiques

Pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude, l'analyse se concentre sur plusieurs paramètres chimiques, notamment les cations majeurs, les anions majeurs et les éléments traces.

III.2.2.1. Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et TZ^+

Les concentrations en cations alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) varient entre 0,9 et 24,2 mg/l et 0,1 et 5,2 mg/l, avec des moyennes arithmétiques respectives de 7 mg/l et 2,2 mg/l (Tableau 5). Pour ce qui est des cations alcalins (Na^+ et K^+), leurs concentrations fluctuent entre 2,7 et 28,6 mg/l et 0,7 et 14,6 mg/l, avec des moyennes arithmétiques respectives de 13,1 mg/l et 7,4 mg/l (Tableau 5). La somme des équivalents cations (TZ^+) varie de 212,8 à 3257,6 $\mu\text{eq/l}$, avec une moyenne arithmétique de 1298,6 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 5).

L'analyse des variations spatio-temporelles révèle des concentrations élevées en cations majeurs dans les ouvrages P32, P2, P37, P43, et des concentrations plus faibles dans les puits P11, P17, P12, P26, P7 (Figure 15-a, b, c, d). Le sodium prédomine dans tous les puits, tandis que le magnésium est le moins présent. L'ouvrage P32 affiche des concentrations très élevées en cations majeurs par rapport aux autres puits. Ces ions résultent de l'hydrolyse des minéraux primaires lors de l'altération des roches et du lessivage des sols.

Dans l'ensemble, les concentrations en cations majeurs respectent les normes établies par l'OMS et l'ANOR. Cependant, les valeurs obtenues sont inférieures à celles rapportées dans les travaux de Youwah (2022) à Yaoundé.

III.2.2.2. Anions majeurs (HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^-) et TZ^-

La concentration en bicarbonate (HCO_3^-) varie de 0 à 202,1 mg/l, avec une moyenne arithmétique de 31,8 mg/l (Tableau 5). Pour le sulfate (SO_4^{2-}), les valeurs oscillent entre 1,2 et 7,9 mg/l, avec une moyenne arithmétique de 3,9 mg/l. L'ion nitrate (NO_3^-) présente une plage de concentration allant de 13,8 à 419,1 mg/l, avec une moyenne arithmétique de 184,5 mg/l. Quant au chlorure (Cl^-), il varie entre 4,8 et 90,1 mg/l, avec une moyenne arithmétique de 35,7 mg/l. La somme d'équivalents anions (TZ^-) fluctue entre 1277,6 et 9973,6 $\mu\text{eq/l}$, avec une moyenne arithmétique de 4600,7 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 5).

L'anion bicarbonate est le moins représenté dans l'ensemble des ouvrages étudiés, avec une concentration élevée dans le puits P17 (figure 14-h). Les anions NO_3^- , Cl^- , et SO_4^{2-} sont présents dans presque tous les puits, avec des concentrations considérables dans les ouvrages P32, P2, P37, P23, P43 (figure 14-e,f,g). Dans l'ensemble, les concentrations en HCO_3^- , Cl^- , et SO_4^{2-} respectent les normes de potabilité des eaux de boisson. Cependant, les puits étudiés montrent une pollution aux nitrates, à l'exception des ouvrages P17 et P7 avec des faibles teneurs. Ces concentrations dépassent largement les normes de l'OMS et de l'ANOR, ce qui pourrait avoir des effets néfastes sur la santé des populations en cas de consommation. Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus par Kengni (2024) à Yaoundé et Youwah (2022) dans la même ville.

III.2.2.3. Balance ionique

D'après les résultats des analyses, la balance ionique oscille entre -89,2 et -48 pour une moyenne arithmétique de -56,9 (Tableau 5). Ces résultats sont marqués dans l'ensemble par un déficit cationique. Ce déséquilibre entre anions et cations peut s'expliquer par le stockage long des échantillons en laboratoire avant les analyses ce qui favorise les processus géochimiques, la faible minéralisation en zone de socle archéen, la présence des acides humiques et fulviques provenant de la décomposition de la matière organique (zone forestière).

III.2.2.4. Eléments traces (PO_4^{3-} , F^- , NH_4^+)

Pour évaluer la présence d'éléments traces, trois éléments chimiques ont été analysés, à savoir l'ammonium (NH_4^+), le fluorure (F^-), et le phosphore (PO_4^{3-}). La concentration en ammonium varie de 0,02 à 12 mg/l, avec une moyenne de 2,4 mg/l. La concentration en fluorure

oscille entre 0,06 et 0,52 mg/l, avec une moyenne de 0,20 mg/l. Le phosphore est absent dans les eaux de la zone d'étude (Tableau 6).

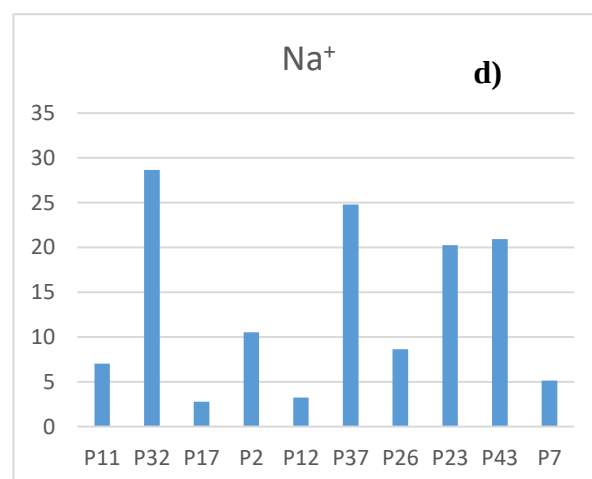
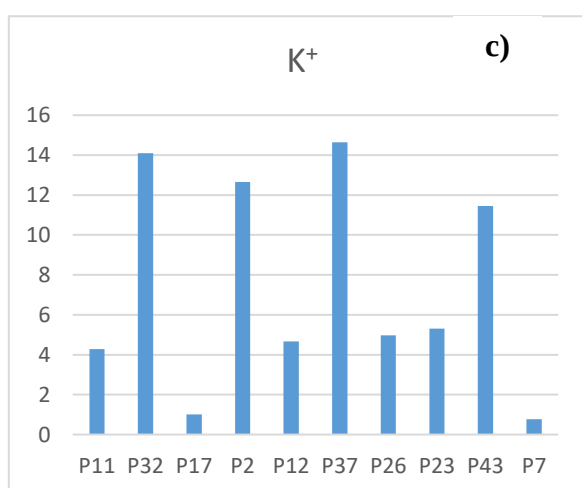
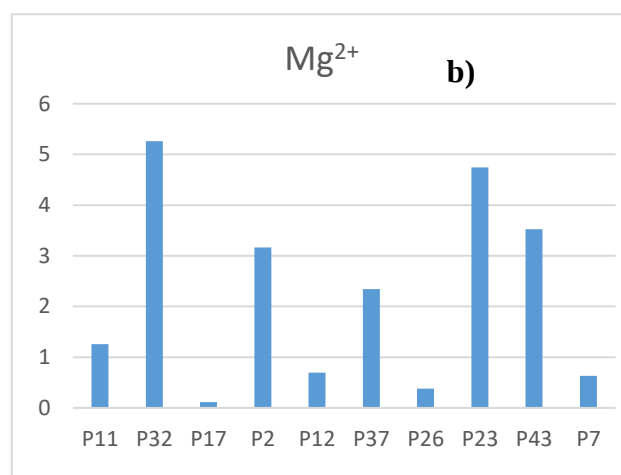
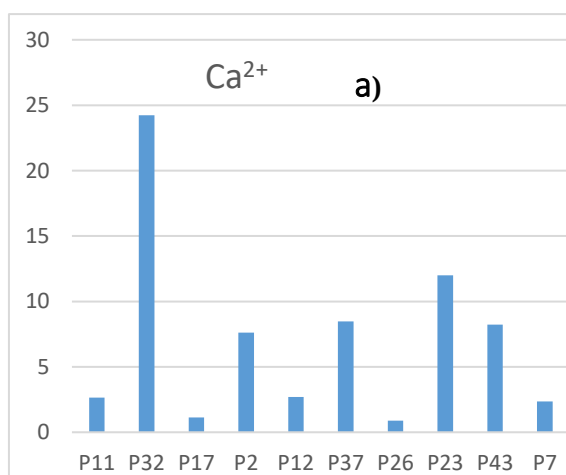
Les concentrations en fluorure et en phosphate respectent les normes de l'OMS, indiquant ainsi l'absence de risque de pollution des eaux souterraines du site d'étude. Cependant, l'ion ammonium présente des concentrations importantes indiquant une pollution dans les ouvrages P32, P37, P23, (figure 15-i) selon les normes établies par l'ANOR et l'OMS. L'ion fluorure affiche des concentrations élevées dans les ouvrages P32 et P2, tandis que la teneur en ammonium est significative dans les puits P32 et P37 (figure 15-i, j). Les concentrations en ammonium sont supérieures à celles relevées par Kengni (2024) dans la localité de Mbankomo et ceux de MentiAgbor *et al.*, (2023) dans ville de Bertoua.

Tableau 5: Variations statistique des paramètres chimiques (ions majeurs).

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TZ ⁺	TZ ⁻	BI
Unités	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µeq/l	µeq/l	/
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Min	0,9	0,1	0,8	2,8	4,9	13,9	1,2	0	212,8	1277,6	-89,2
Max	24,2	5,3	14,6	28,7	90,1	419,2	8,0	202,1	3257,6	9973,6	-48,0
Moy	7,0	2,2	7,4	13,2	35,7	184,5	3,9	31,8	1298,7	4600,7	-56,9
Med	5,2	1,8	5,1	9,6	23,6	181,0	3,3	15,9	1014,0	4195,70	-53,1

Tableau 6: Variations statistiques des paramètres chimiques (éléments traces)

PARAMETRES	F ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ²⁻
unités	mg/l	mg/l	mg/l
N	10	10	10
min	0,06	0,02	0
max	0,5	12,1	0
moy	0,2	2,21	0
med	0,2	0,4	0



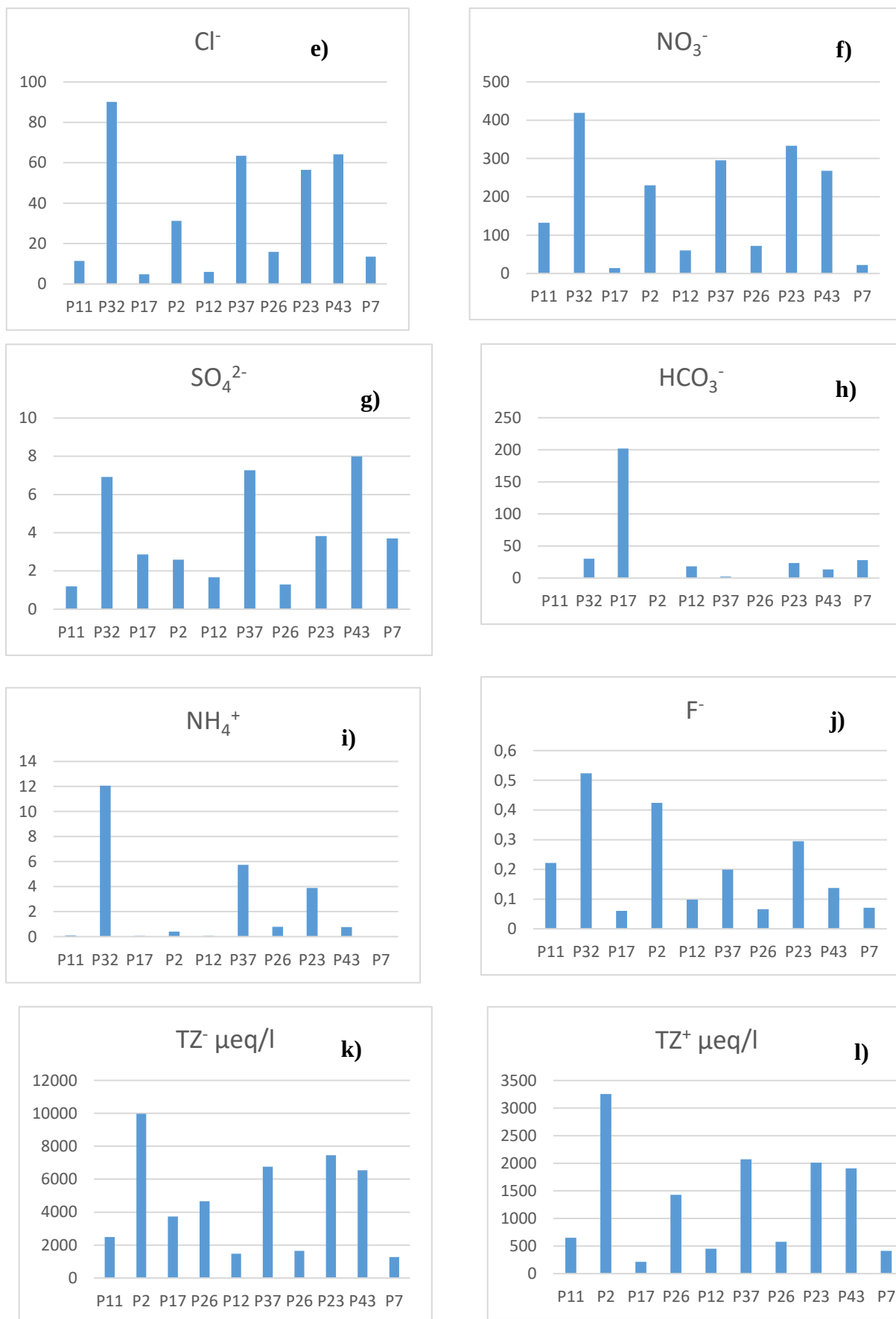


Figure 15 : Variation spatiale des paramètres chimiques.

III.2.2.5. Faciès hydrochimiques

Selon les résultats de l'analyse des principaux éléments issus du diagramme de Piper, il apparaît que le triangle des cations est largement dominé par le sodium et le potassium, tandis que sur le triangle des anions, l'ion chlorure prédomine sur l'ion bicarbonate (figure 16). Les faciès hydrochimiques des eaux souterraines dans la zone d'étude se divisent en deux types : le faciès chloruré-sodique-potassique et le faciès bicarbonaté-sodique-potassique. Ces observations sont proches des résultats de MentiAgbor *et al.*, (2023) dans la ville de Bertoua, qui identifie également deux faciès, à savoir le faciès chloruré-calcaïque et le faciès bicarbonaté-calcaïque, avec quelques échantillons présentant un mélange chloruré-calcaïque-magnésien.

L'ordre d'abondance des éléments chimiques dans les eaux souterraines du secteur d'étude se présente comme suit, de manière décroissante (figure 16) : (NO_3^- (68%) > Cl^- (10%) > Na^+ (10%) > Ca^{2+} (4%) > K^+ (4%) > Mg^{2+} (3%) > SO_4^{2-} (1%) > HCO_3^- (0%).

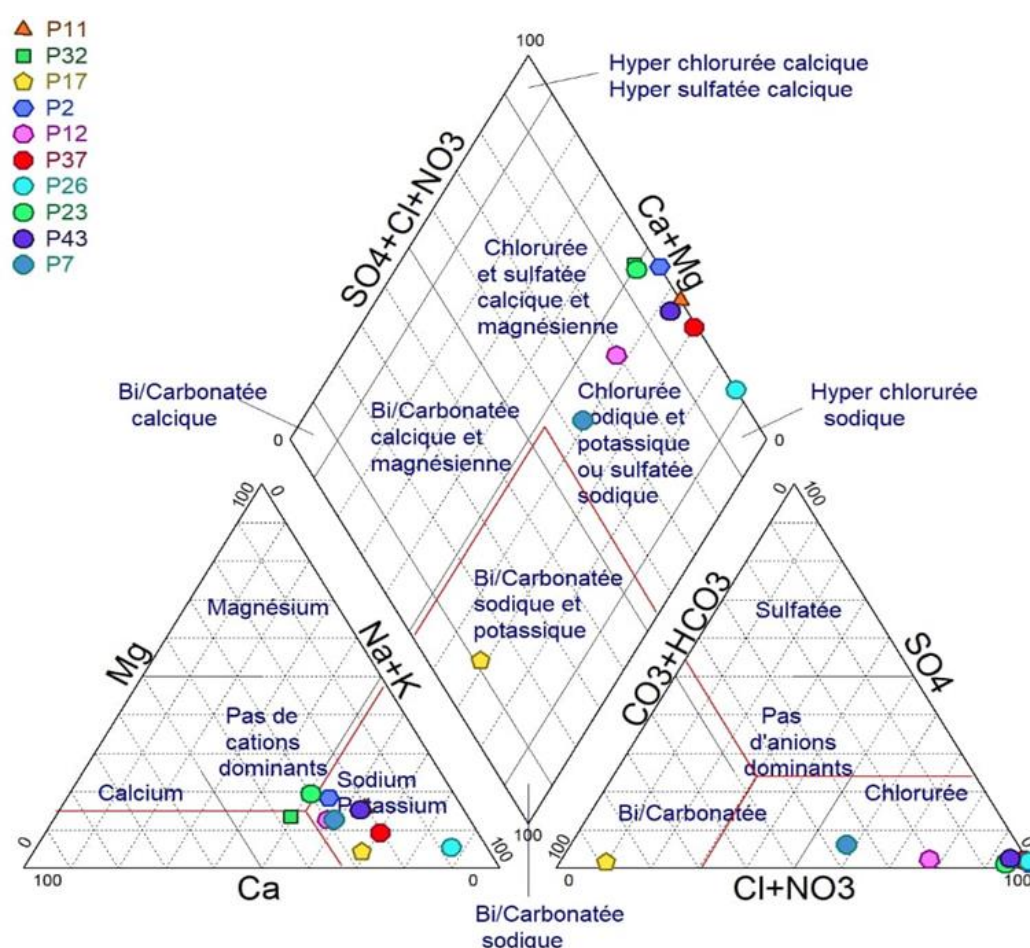


Figure 16 : Diagramme de Piper (1944) des eaux souterraines de Bertoua 1.

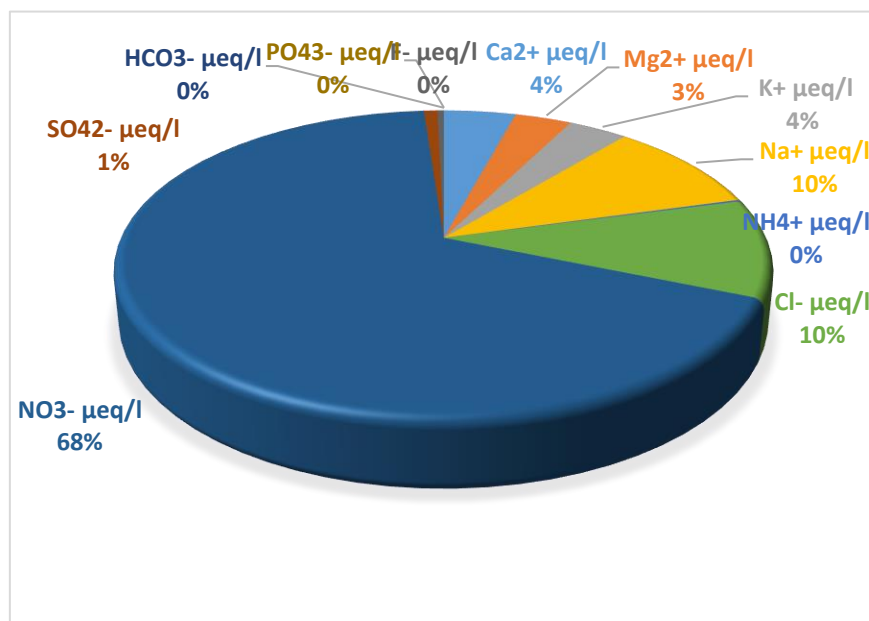


Figure 17 : Proportion moyenne des éléments chimiques dans les eaux souterraines de la ville de Bertoua 1.

III.2.3. Variation spatiale des paramètres bactériologiques

Une analyse bactériologique a été réalisée sur l'ouvrage P32 en raison de sa proximité avec des latrines (environ 5 mètres), dans le but d'évaluer les risques de contamination par des germes pathogènes. Les résultats de cette analyse révèlent que les coliformes fécaux dans cet ouvrage atteignent une concentration de 589 UFC/100 ml, tandis que les streptocoques fécaux sont présents à hauteur de 330 UFC/100 ml (tableau 7, figure 18).

Ces concentrations en coliformes fécaux et streptocoques fécaux dépassent largement les normes établies par l'OMS, fixées à 0 UFC/100 ml (annexe 3). Par conséquent, cet ouvrage représente un risque potentiel pour la santé des populations en cas de consommation, mettant en évidence la nécessité d'un traitement conseillé pour minimiser ces risques de contamination bactériologique (annexe 4.)

Tableau 7: Variation statistique des paramètres bactériologique dans l'ouvrage P32

Echantillon	Coliforme fécaux	Streptocoques fécaux
Unités	UFC/100ml	UFC/100ml
P32	589	330

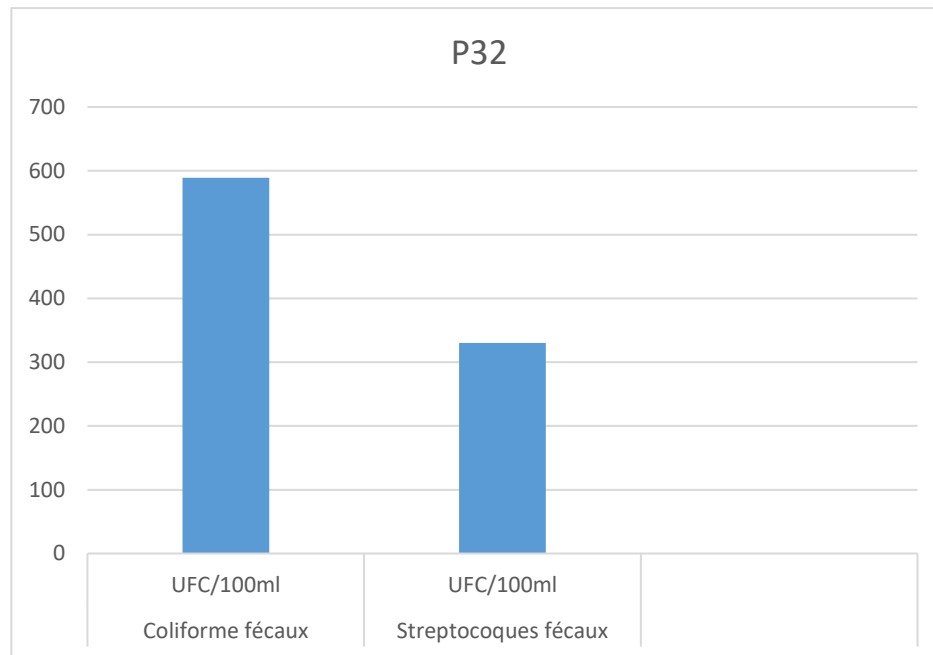


Figure 18 : Variation spatiale des paramètres bactériologiques de l'ouvrages P32

III.3. VARIATION STATISTIQUE MULTIVARIEE ET ORIGINE DES ELEMENTS DISSOUS DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE L'ACQUIFERE LIBRE DU SECTEUR D'ETUDE

III.3.1. Analyse statistique multivariée

Dans cette étude, l'analyse statistique multivariée réalisée prend en compte la matrice de corrélation et l'analyse en composante principale (ACP).

III.3.1.1. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation présentée dans le Tableau 8 montre de bonnes corrélations (coefficient de corrélation $r \geq 0.70$) entre certaines substances dissoutes prises deux à deux. C'est le cas de :

- TZ⁺ avec TZ⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS, MES, F⁻ ;
- TZ⁻ avec Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS, MES; MES, F⁻ ;
- Ca²⁺ avec Mg²⁺, Na⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS, MES, F⁻ ;
- Mg²⁺ avec Na²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS, F⁻ ;
- Na⁺ avec K⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS ;
- K⁺ avec Cl⁻, NO₃⁻, CE, SA, TDS, MES ;

- NH_4^+ avec Cl^- , NO_3^- , CE, SA, TDS ;
- HCO_3^- avec ALC, pH ;
- Cl^- avec SO_4^{2-} , NO_3^- , CE, SA, TDS ;
- SO_4^{2-} avec CE, SA, TDS ;
- NO_3^- avec CE, SA, TDS, MES, F^- ;
- pH avec ALC ;
- CE avec SA, TDS ;
- TDS avec MES, F^- ;

Tableau 8: Matrice de corrélation paramètres physico-chimiques

	TZ+	TZ-	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	NH4+	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	pH	temp	Cond élect	alcalinité	Salinité	TDS	O,Dissout	Turbidité	MES	F-
TZ+	1																				
TZ-	0,9306	1																			
Ca2+	0,954	0,9067	1																		
Mg2+	0,9187	0,9036	0,9051	1																	
Na+	0,9428	0,9192	0,8533	0,8537	1																
K+	0,8334	0,7249	0,6828	0,688	0,8057	1															
NH4+	0,8865	0,8267	0,9182	0,7101	0,8312	0,6256	1														
HCO3-	- 0,3362	- 0,0342	- 0,1909	- 0,3164	- 0,3341	- 0,4455	- 0,1247	- 1													
Cl-	0,9566	0,9413	0,9003	0,8941	0,9871	0,8015	0,836	0,2899	1												
SO42-	0,7033	0,7694	0,6395	0,6178	0,8328	0,6801	0,6067	0,0814	0,8543	1											
NO3-	0,9741	0,9354	0,902	0,956	0,9451	0,8151	0,7949	0,3734	0,9488	0,6874	1										
pH	- 0,1717	- 0,124	- 0,0164	- 0,1986	- 0,1189	- 0,3204	- 0,0973	- 0,9343	- -0,078	- 0,1646	- 0,2245	- 1									
temp	- 0,3086	- 0,3962	- 0,4262	- 0,3483	- 0,3086	- -0,169	- 0,3283	- 0,1196	- 0,3774	- -0,524	- 0,3066	- 0,3089	- 1								
Cond élect	0,96	0,9342	0,9255	0,8753	0,9785	0,7582	0,9072	0,2746	0,9821	0,7863	0,9411	0,0441	0,3567	1							
alcalinité	-0,457	- 0,2091	- 0,3571	- 0,4693	- 0,5116	- 0,5288	- 0,2842	- 1	- 0,4942	- 0,4067	- 0,5013	- 0,9871	- 0,3324	- 0,4833	- 1						

Salinité	0,9594	0,9354	0,9277	0,8752	0,9772	0,7581	0,9079	-	0,2684	0,9827	0,7933	0,9395	-0,035	-	0,3731	0,9998	-0,4855	1					
TDS	0,9606	0,9312	0,924	0,8752	0,9793	0,7614	0,906	-	0,2857	0,982	0,7849	0,9422	0,0546	-	0,3543	0,9999	-0,4935	0,9997	1				
O,Dissout	-		-		-	-	-	-	0,1019	-0,008	0,198	0,0314	0,1414	-	0,2926	-0,093	-0,0936	0,0841	0,0941	1			
Turbidité	-	-0,219	-	-	-	-	-	-	0,1817	0,0731	0,1727	0,1698	0,1367	-	0,5238	0,0128	-0,2657	0,0254	0,0115	-0,1828	1		
MES	0,7277	0,5945	0,6104	0,6199	0,6458	0,8445	0,4936	-0,472	0,6561	0,5554	0,7154	0,4097	-	-	0,4223	0,5901	-0,5559	0,5933	0,5936	-0,1705	-0,5795	1	
F-	0,8268	0,7111	0,8224	0,8214	0,6093	0,6752	0,6695	-	0,3058	0,649	0,2815	0,8007	0,2979	-	0,1279	0,6574	-0,3333	0,6563	0,6582	-0,2021	-0,3479	0,6662	1

III.3.1.2. Analyse en composante principale (ACP)

L'Analyse en Composante Principale (ACP) figure parmi les méthodes couramment employées pour l'analyse de données multivariées. Elle vise à identifier les relations entre les variables et à regrouper celles présentant des comportements similaires, permettant ainsi de comprendre la source de la composition chimique des eaux souterraines (Mbadngonel, 2020). Dans le cadre de la présente étude, l'ACP a été réalisée à partir de 21 paramètres, comprenant 12 paramètres chimiques et 9 paramètres physiques (figure 19).

Le facteur F1 (62,3%) rassemble 16 éléments, à savoir : CE, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Na^+ , NO_3^- , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , TZ^+ , TZ^- , TDS, MES, SAL. Cet axe désigne la minéralisation, suggérant ainsi une origine naturelle géogénique causée par l'altération des roches et au lessivage des sols.

Le facteur F2 (14,6%) regroupe les éléments suivants : ALC, HCO_3^- , pH, représentant ainsi la pollution d'origine anthropique provenant des eaux grises et noires, les pratiques agricoles et l'atmosphère. Ce facteur montre les interactions entre les eaux souterraines du secteur d'étude et les eaux de ruissellement issues des précipitations.

L'association des facteurs F1 et F2 révèle une origine combinée, à la fois naturelle et anthropique, illustrée notamment par la température et la turbidité.

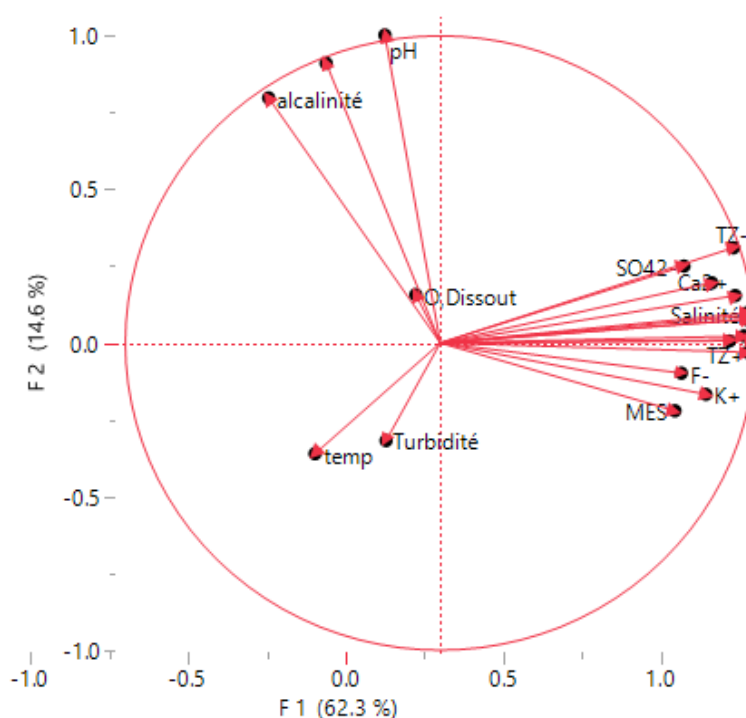


Figure 19 : Projection des variables sur le plan factoriel F

III.4. Origines des paramètres physico-chimiques

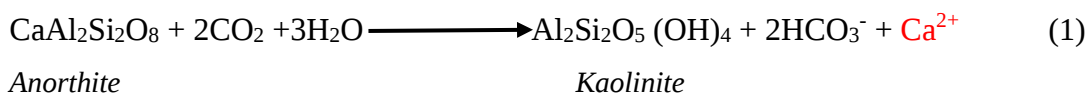
Les corrélations entre les éléments traduisent des origines communes et l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux dans le site d'étude. La minéralisation de ces eaux peut avoir des origines diverses à savoir : les apports atmosphériques, géogénique et anthropique.

En effet, le chimisme des eaux du site d'étude est contrôlé par le contact eau-roche (Kengni et *al.*, 2012). Etant donné que la géologie de la ville est en majorité dominée par les minéraux silicatés des roches, l'hydrolyse de ces minéraux libèrent les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) d'après les équations (1), (2), (3) et (4)

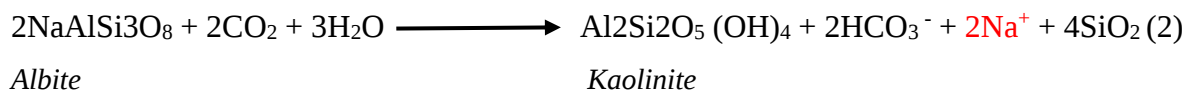
Au cours l'hydrolyse des minéraux primaires, les bicarbonates, les cations majeurs et la silice sont libérés à partir de l'altération des roches et du lessivage des sols d'après l'équation générale :

Minéraux primaires + CO_2 + H_2O $\longrightarrow$ HCO_3^- + minéraux secondaires + cations + silice.

Hydrolyse de l'anorthite en kaolinite :



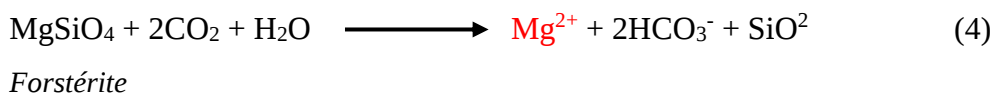
Hydrolyse de l'albite en kaolinite :



Hydrolyse de l'orthose en montmorillonite :



Hydrolyse de l'olivine :



Les eaux du site d'étude sont dans l'ensemble faible en bicarbonate. Ces bicarbonates (HCO_3^-) proviendraient de l'hydrolyse des minéraux de roches silicatés tels que les feldspaths alcalins (orthose) et les plagioclase calco-sodiques (anorthite et albite), de la dissolution du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique.

Les ions nitrate (NO_3^-) sont majoritairement présent dans l'ensemble des eaux du secteur d'étude. Leurs principales sources seraient : le rejet des ordures dans les eaux de surface, l'utilisation non calibrée des engrais, l'oxydation de l'azote atmosphérique, les eaux de ruissellement et le lessivage des terres par les précipitations et l'oxydation de l'azote. La présence du nitrate en teneur élevée en profondeur (eau de nappe) montre qu'il y'a une infiltration verticale dans la zone saturée (Yao et *al.*, 2012). Contrairement aux travaux de MentiAgbor et al., (2023) sur quelques points d'eau de la ville de Bertoua qui présentent une faible teneur en nitrate.

Le chlore est un minéral des roches métamorphique et magmatique pouvant provenir de l'altération des minéraux tels que : sodalite, apatite. Cet anion peut aussi avoir une origine humaine (chloration des eaux, l'utilisation des pesticides, l'utilisation des pesticides dans cultures maraichères, des rejets humains et animaux (Rakotondrabe et *al.*, 2017b)) et des apports météoriques.

Le sulfate quant à lui provient de l'utilisation des produits phytosanitaires (pesticides, herbicides et fongicides), des apports météoriques et l'oxydation de la pyrite (FeS_2) présent dans les roches métamorphiques (Rakotondrabe et *al.*, 2017b).

La présence des ions ammoniums dans ces eaux serait liée aux apports d'origine domestiques, agricole et industrielle (Aboudi et *al.*, 2014). Elle pourrait aussi provenir du processus de dégradation de la matière organique en saison de pluies puis le lessivage des sols.

Les ions fluorures trouvent leurs origines dans la dissolution des minéraux naturels présents dans les roches volcaniques et lixiviation des sols ferralitiques du site d'étude.

Les matières en suspension (MES) proviennent de l'altération chimique des roches sous-jacents, des apports atmosphériques essentiellement des précipitations, des débits continentaux résultant de l'érosion des sols.

III.5. Origine des paramètres bactériologiques

La présence des germes pathogènes dans les eaux du secteur d'étude serait due à plusieurs facteurs à savoir : aux décharges publiques, à l'infiltration des eaux de surface polluées dans la nappe en profondeur, la forte densité des populations causant la multiplication des latrines à fond perdu à proximité des ouvrages permettant ainsi le contact avec les matières fécales. D'après les enquêtes effectuées sur le terrain la consommation de ces eaux a un effet délétère sur les populations à travers des maladies comme la typhoïde, la dysenterie, la diarrhée, le choléra.

III.6. FACTEURS DE VULNERABILITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE D'ETUDE EN RAPPORT AVEC LE MILIEU PHYSIQUE ET HUMAIN

La composition minéralogique des eaux de la localité de Bertoua I est le résultat de plusieurs sources de contamination dont les plus importantes sont : les activités anthropiques, la géologie, le type d'aquifère et de nappe.

III.6.1. Activités anthropiques

L'anthropisation est la principale cause de vulnérabilité et de la contamination physique et chimique des eaux de la localité de Bertoua I. Ce facteur est amplifié par la pression et la croissance démographique importante ainsi que l'urbanisation anarchique de la zone, qui se manifeste de diverses manières à savoir : la contamination directe par des latrines à fond perdu dont la profondeur côtoie le niveau piézométrique de la nappe, le rejet anarchique des déchets solides et liquides dans la nature qui sont drainés par la suite vers les cours d'eau puis finissent dans l'aquifère après les pluies, l'utilisation des produits agricoles comme les herbicides, les pesticides, les engrais à proximité des ouvrages et cour d'eau du secteur d'étude.

III.6.2. Le type d'aquifère et de nappe

Les eaux souterraines étudiées sont piégées dans la nappe libre avec des formations géologiques généralement du type argilo-sableuses ce qui facilite l'infiltration verticale des eaux superficielles et le drainage latéral des eaux issus des fosses septiques ou des latrines.

III.6.3. Géologie

La géologie du secteur est constituée des vieilles roches dont les plus abondantes sont des granitoïdes d'âge panafricain mises en place entre 660 Ma et 580 Ma (Toteu et al., 2004). Ces roches au cours du temps sont généralement déstabilisées sous l'action des conditions

atmosphériques qui règnent dans le milieu provoquant ainsi la libération des nouveaux matériaux qui sont lessivés et transportés vers la nappe modifiant la composition chimique de ces eaux.

III.7. CLASSIFICATION DES EAUX PAR LE DIAGRAMME DE WILCOX

Le diagramme de wilcox repose sur la conductivité électrique et la teneur en sodium exprimées en pourcentage et en rapport avec les pratiques agricoles. Ce diagramme est donné par la relation suivante : $\%Na^+ = [(Na^+ + K^+) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+)] \times 100$ avec tous les ions exprimés en méq/l. l'analyse de ce modèle montre que ces eaux sont d'excellente qualité à l'irrigation et favorable à toutes les cultures (figure 20). Ces résultats obtenus concordent avec ceux rapportés par MentiAgbor *et al.* (2023) dans la ville Bertoua.

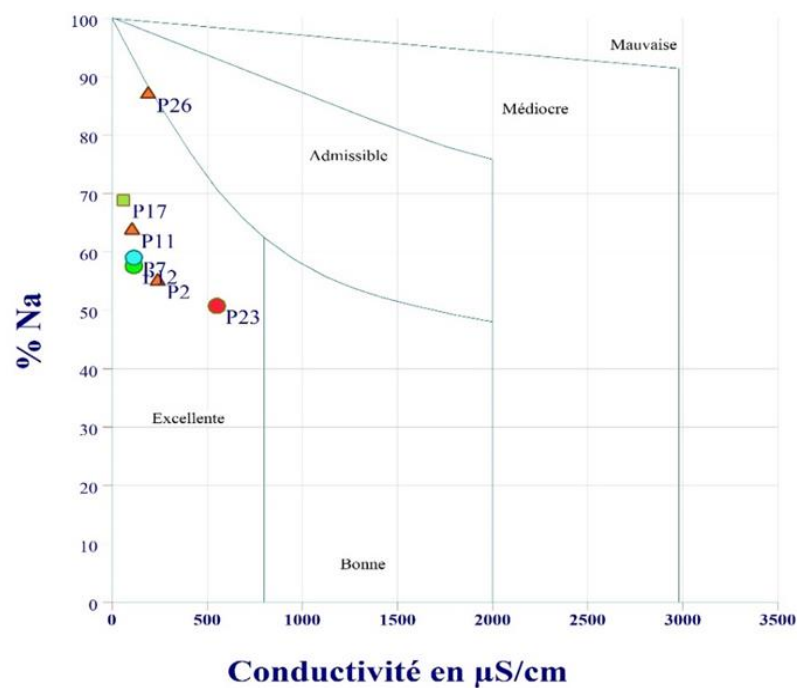


Figure 20 : Présentation de l'aptitude des eaux à l'irrigation d'après le diagramme

III.8. QUELQUES SOLUTIONS PROPOSEES POUR AMELIORER LA QUALITE DES EAUX DU SECTEUR D'ETUDE

La pression exercée par les populations ainsi que les activités anthropiques polluent ces ressources en eaux. Cette situation désagréable pousse les parties prenantes comme les ONG, les collectivités territoriales décentralisées, les pouvoirs publics à agir par les méthodes préventives dans le but d'éviter la contamination des eaux. La protection de la nappe sera d'autant plus efficace que la zone non saturée est épaisse et que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible (Fomegni, 2009). Hors mis les facteurs naturels qui protègent les eaux souterraines et de surface des pollutions, on peut également citer :

- la sensibilisation des populations sur la nécessité de la protection des ressources en eau de surface et des nappes souterraines ;
- mettre en place des stations d'épuration des eaux usées et le recyclage des déchets solides ;
- la construction des latrines publiques dans les zones à forte concentration humaine afin d'éviter les défécations à l'air libre ;
- l'utilisation du dioxyde de chlore pour la désinfection de l'eau ;
- la construction des fosses septiques loin des ouvrages d'approvisionnement en eau ;
- la mise en place des périmètres de protection autour des points captages d'eau ;
- la construction des margelles (au moins 1 m) autour des puits ;
- la réalisation des latrines à fond étanches (10 m) au dépend des latrines à fond perdu qui sont généralement en contact avec les nappes souterraines captées ;
- mener des études spécifiques afin d'identifier et de ne capter que les nappes captives qui sont beaucoup plus profondes et moins vulnérables par rapport aux nappes libres.

CONCLUSION

Les niveaux piézométriques enregistrés dans les quarante-huit (48) puits suivis pendant la présente étude varient de 623,6 m pour le puit 34 en saison de pluie à 667,7 m pour le puit 14 en saison sèche. Les fluctuations piézométriques sont faibles dans l'ensemble des ouvrages étudiés et oscillent entre 0,39 m enregistré dans le puit 19 à 3,56 m enregistré dans le puit 14. L'observation des cartes piézométriques révèle deux types d'écoulement souterrain (convergent et divergent). La zone située au sud de Tindamba et matérialisée sur la carte par un cercle quadrillé correspond à une zone de dépression piézométrique qui est favorable à la construction des ouvrages de captage. Les analyses des paramètres physicochimiques des eaux souterraines

du site d'étude montrent des températures variantes entre 22,4°C et 22,5°C avec une moyenne de température proche de celle de l'atmosphère (24,4°C). Ces eaux sont acides dans l'ensemble ($3,4 \leq \text{pH} \leq 9,7$) avec une faible à importante minéralisation ($58,3 \mu\text{S/cm} \leq \text{CE} \leq 857 \mu\text{S/cm}$) et deux faciès. L'ordre d'abondance des éléments chimiques est le suivant : (NO_3^- (68%) > Cl^- (10%) > Na^+ (10%) > Ca^{2+} (4%) > K^+ (4%) > Mg^{2+} (3%) > SO_4^{2-} (1%) > HCO_3^- (0%). Les concentrations en ions majeurs, fluorure et phosphate respectent les normes prescrites par l'OMS à l'exception du nitrate. Les études statistiques des éléments dissous dans ces eaux montrent qu'elles ont des origines diverses : géologiques, atmosphériques, et anthropiques. Ainsi, les principaux facteurs de vulnérabilité de ces eaux souterraines sont à de degrés divers sur le site sont : les activités anthropique, l'agriculture, la mauvaise gestion des déchets ménagers, la nature des formations géologiques traversées. La présence remarquée des coliformes fécaux et des streptocoques fécaux dans certains ouvrages témoigne d'une pollution biologique d'origine humaine dû à l'insuffisance dans le système d'assainissement pluvial et individuel (latrines à fond perdu, rejet des déchets liquides et solides, etc.). Ces eaux nécessitent un traitement préalable avant toute consommation par les populations.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Le bassin versant de Badombé qui fait l'objet de notre étude est situé dans la région de l'Est, département de Lom et Djérem et arrondissement de Bertoua I. Le secteur d'étude est une mosaïque forêt-savane qui limite la forêt qui s'étend vers le sud et la savane qui s'étend vers le nord. Ce secteur est compris entre les méridiens 13°40' et 13°44' Est et les parallèles 4°33' et 4°37' Nord.

Pour comprendre le comportement hydrodynamique et évaluer la qualité des eaux du bassin de Badombé, l'approche méthodologique adoptée a consisté en la recherche documentaire et cartographique, aux travaux de terrain (inventaire et suivi des ouvrages hydrauliques, mesure in situ des paramètres physico-chimiques, prélèvements et conditionnements des échantillons d'eaux souterraines) et de laboratoire (conditionnement des échantillons, traitement et analyse des données physico-chimiques obtenues à partir des outils statistiques, hydrochimiques et des SIG (ArcGIS 10.8 et Surfer 16) au laboratoire de Géosciences des formations Superficielles et Applications de l'Université de Yaoundé 1).

Ces travaux ont permis d'aboutir aux résultats suivants :

Sur le plan hydrodynamique, les niveaux piézométriques des quarante-huit puits suivis dans le cas de notre étude varient de 623,6 m en saison des pluies à 664,5 m en saison sèche. Les fluctuations piézométriques sont comprises entre 0,39 m enregistré dans le puit 19 à 3,56 m enregistré dans le puit 14. L'analyse des cartes piézométriques montre l'écoulement non uniforme des eaux souterraines (convergent et divergent). Les zones situées au nord plus précisément dans la localité de Tindamba et sud dans la localité d'Ekombitié matérialisées sur les cartes par des courbes fermées et circulaires constituent un dôme piézométrique, alors que celle située au sud de Tindamba et matérialisée sur la carte par un cercle quadrillé correspond à une dépression piézométrique marquée par la convergence des lignes de courant. Ces zones sont favorables à l'implantation facile des ouvrages de captage.

Sur le plan physico-chimique, les températures des eaux souterraines du secteur d'étude varient de 22,4°C à 22,5°C pour une moyenne proche de la température de l'atmosphère qui est de 24,40°C, cette proximité montre ainsi le relation eau souterraine-atmosphère. D'après les résultats des analyses ces eaux sont dans l'ensemble acide ($3,4 \leq \text{pH} \leq 9,7$) avec une minéralisation faible à importante ($58,3 \mu\text{S/cm} \leq \text{CE} \leq 857 \mu\text{S/cm}$) et deux faciès hydrochimiques de type : le chloruré-sodique-potassique et le bicarbonaté-sodique-potassique d'après le diagramme de Piper. Les teneurs en cations, anions majeurs et éléments traces sont dans l'ensemble conformes

aux normes de potabilité des eaux prescrites par OMS et ANOR à l'exception des du nitrate et l'ammonium qui sont en excès dans certains ouvrages présentant ainsi une pollution. La présence accentuée des germes pathogènes telle que les coliformes et streptocoques fécaux dans l'ouvrage P32 montre une pollution biologique d'origine humaine. Ces eaux sont d'excellente qualité à l'irrigation mais nécessitent donc un traitement préalable avant toute consommation humaine.

D'après les résultats obtenus dans la présente étude donc le but est d'évaluer le fonctionnement hydrodynamique et la qualité des eaux souterraines du bassin versant de Badombé et palier aux difficultés d'approvisionnement en eau potable, il serait d'une grande importance :

- d'effectuer au pas de temps journalier un suivi piézométrique et déterminer les caractéristiques physique de l'aquifère de ce bassin versant pendant une longue période ;
- de réaliser une des études physico-chimiques et bactériologiques sur plusieurs ouvrages pour mieux se prononcer sur la qualité et la potabilité des eaux ;
- d'établir une modélisation avancée des écoulements souterrains pour connaître le mécanisme de transfert des polluants ;
- délimiter des périmètres de sécurité autour des points d'eau par la réglementation des activités au voisinage de ceux-ci susceptibles d'influer sur la qualité de l'eau.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdoulkadri A. M., (2015) :** Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9 (1) :517-533.
- Abakar Mahamat. A., (2023) :** Hydrodynamique et qualité des eaux souterraines de l’acquière quaternaire dans le 9^{ème} arrondissement de la ville de N’Djamena (République du Tchad). Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 55p
- Anaba Onana, A., (2017) :** Caractérisation hydrodynamique et analyse de la productivité des aquifères de fissures et de fractures du socle cristallin : cas de la région de Centre cameroun. Thèse de Doctorat/PhD, Université de Yaoundé 1, 227 p.
- Bagnouls, F., Gaussen, H., (1957) :** Les climats biologiques et leur signification géographique. *Ann. Géol XXVI*, pp 193-230.
- BUCREP., (2010) :** Rapport final du troisième Recensement Général de la Population et de l’Habitat du Cameroun 3^{ème} (RGPH), 67 p.
- Castany, G., (1998) :** Principes et méthodes de l’hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris V, 236p
- Criaud, J., (1985) :** Géographie du Cameroun. Nouvelle édition : les Classiques Africaines. *Éditions St-Paul. FRANCE.*
- Detay., (1993) :** Forage d’eau (réalisation, entretien, minéralisation). Eds. Masson. Paris, 280p.
- Everitt, B. S., and Horthon, T., (2011):** An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R. *Springer, New York, ISBN 978-1-4419-9649-7.*
- Eyong Ngahiri J.P., (2013) :** Etude de la recharge des nappes phréatiques en milieu urbain : cas du bassin versant de l’Akée Yaoundé-Cameroun, Mém. Master. Fac. Sces, Univ. Yaoundé I, 78p.
- Feumba, R., (2005) :** Hydrogéologie en zone de socle cristallin : Cas du bassin versant de l’Ekooza, secteur nord de la ville de Yaoundé – Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. DST. Univ. Yaoundé I, 94p.
- Fomegni Njakou. J. C., (2009) :** Qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique et des effluents dans le bassin versant de Besséké à Bonabéri (zone industrielle de Douala) Cameroun. Mém. DEA, Univ. Yaoundé I, 78p.
- Freyssinet P, Lecomte P, Edimo A., (1989):** Dispersion of Gold and Base Metals in the Mborguéné Lateritic Prole, East Cameroun. *J Geochem Explor* 32:99– 116. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(89\)90050-2](https://doi.org/10.1016/0375-6742(89)90050-2)

Gleick, P. H., (1996) : Besoin en eau de base pour les activités humaines : répondre aux besoins fondamentaux. *Water International*, 21, No (2). 83-92.

INS (2019) : Caractéristique de la population camerounaise chapitre 3, 29p

Kamgang Kabeyene Beyala V., (1998) : Evolution supergène des roches et incidence phytogéographique : Cas du contact forêt-savane au Sud-est Cameroun. Thèse d'Etat, Sciences Naturelles de l'Université de Yaoundé I, 208p.

Kengni Derrick., (2023) : Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des ressources en eau dans la localité de Mbankomo. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 82p

Kouassy Kalédjé P. S., (2007) : Etude piézométrique et caractérisation hydrochimique des eaux souterraines du bassin de la Bibakala (Nord-ouest de Ngaoundéré). Mem. DEA Fac. Sci. Univ. Ydé I, 80p

Kouassi, M. A., Yao, A. K., Ahoussi, E. K., Seki, C. L., Biemi, J., (2010) : Apports des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 1816-1838

Kouassy Kalédjé P.S., Ndam Ngoupayoua J.-R., Rakotondrabe F, Mvondo Ondoa J., (2020). Quantitative assessment of water resources by the method of the hydrological balance in the Kadey catchment area (East-Cameroon). Journal homepage <http://www.elsevier.com/locate/gsd>.

Kpoumié A., (2015) : Hydroclimatologie et transports solides dans un écosystème tropical anthropisé d'Afrique centrale dans un contexte déficitaire : cas du bassin versant de la Sanaga au Cameroun. Th. Doc. PhD, Univ. Yaoundé I, 241p

Letouzey R., (1985) : Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/50 000 à Institut de la carte internationale de la végétation, 63–94

Mati, B., (2021) : Hydrodynamique et qualité des eaux souterraines de la commune de Moundou (République du Tchad). Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 57

Matiatos, I., Alexopoulos, A., Godelitsas, A., (2014): Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in northeastern Peloponnesus (Greece). *Science of the Total Environment*, 476 : 577-590.

Mbadngonel, M. C., (2020). Ressources en eau dans le centre urbain de N'Djamena : qualité et vulnérabilité. Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 68p.

MentiAgbor Nelson, Engome Regina Wotany, Christopher Agyingi, Mengnjo Jude

- Mfonka, Z., Ndam, N. J. R., Ndjigui, P. D., Zammouri, M., Kpoumie, A., Rasolomanana, E., (2015) :** Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4) : 2200-2218.
- Moucherou, O. F., (2016) :** Hydrogéochimie des systèmes d'aquifères associés aux roches volcaniques et aux sources minéralisées du Plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC). Thèse de Doctorat PhD. Univ. de Ydé I, 126 p.
- Mouchikpou, N. A., (2021) :** Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de consommation du périmètre urbain de Koutaba. Mémoire de Master, UY1. 67p
- Nana, G. A., (2015) :** Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Mewoulou (Nord-Yaoundé). Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 83p.
- Nap Jiemessa F. N., (2017) :** Caractérisation hydrodynamique et vulnérabilité des sources de Fouban (Ouest-Cameroun) Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 79p.
- Ndam Ngoupayou, J. R., (1997) :** Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique : du bassin expérimental de nesmi-zoetele aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga au sud-Cameroun (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Ndam, N. J. R., Bon, A., Ewodo, M. G., Ngouh, A. N., Ekodeck, G. E., (2019):** Hydrogeological Characteristics of Shallow Hard rock aquifers in Yaoundé (Cameroon, Central Africa). *In Intech open, the world's leading publisher of open access books*. 17p.
- Ndzengue, W. S., (2021) :** Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de Mbalngong, centre Cameroun. Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 91p.
- Ngouh, A. N., Kpoumie, A., Ghislain Nyembe, E., Ndam Ngoupayou, J. R., (2020) :** Caractérisation Hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé–Cameroun). *European Scientific Journal*. 281-308. URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n15p281>.
- Ngoupayou J. R., (2020):** Hydrodynamic characterization and water quality of the Nkié watershed (Yaounde-Cameroon). *European Scientific Journal*, vol. 16, (15).

- Ngoundoum Fomouuo, D., (2013) :** Hydrologie et qualité des eaux de surface du bassin versant élémentaire d'Odza (Yaoundé-Cameroun). Mém. de Master, Fac. Sces, Univ. Yaoundé I, 66 p.
- Nsangou, D., (2016) :** Etude de la vulnérabilité des ressources en eau du bassin versant du Mfu sur le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 81p.
- Nono A., Likeng J. D. H., Wabo H., Tabue Y. G., Biaya S., (2009) :** Influence de la nature lithologique et des structures géologiques sur la qualité et la dynamique des eaux souterraines dans les hauts plateaux de l'Ouest-Cameroun. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 3(2) : 218239.
- Nteuga N. S., (2012) :** Fonctionnement hydrologique et la qualité des eaux du bassin versant de Nkié à Yaoundé (Sud-Cameroun). Mém. Master, Univ. Yaoundé 1, 58p.
- Nyeck B., (1988) :** Organisation et aptitude culturale des sols de Zoétélé dans la région forestière humide du Sud-Cameroun. Etude de deux toposéquences sur granite. Thèse 3ème cycle. Université de Yaoundé I, 324p.
- Nzenti J. P., Barbey P., Macaudier E. J., Soba D., (1988):** Origin and evolution of the late Precambrian high grade Yaoundé gneiss (Cameroon). *Precambrian Research* 38, pp 91 – 109
- Nzenti, J. P., Njanko, N. E. L. T., Tchoua, F. M., (1998) :** Les domaines granulitiques de la chaîne panafricaine Nord-Equatoriale au Cameroun. Géologie et environnement au Cameroun, Vicat et Bilong (Eds.) : *Collect. GEOCAM* 1, 255-264
- Nzenti, J.P., Badibanga Kapajika, G., Wörner Toto, R.L., (2006):** Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*, 45, 74-86.
- Nzenti, J.P., Abaga, B., Suh, C. E., Nzolang, C., (2011):** Petrogenesis of peraluminous magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. *International Geology Review*, 1, 1–29.
- OMS., (2017) :** Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif. 539 p.
- PCFC., (2010) :** Gestion Environnementale et Sociale du Projet Compétitive des Filières de Croissance, 30-33p
- Penaye J., Kroner A., Toteu S. F., Van Schmus W. R., and Doumnang J.-C., (2006):** Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by zircon dating: An early (ca. 740 Ma) Pan-African magmatic arc in southwestern Chad. *Journal of African Earth Sciences* 44(45), 530-542.

- Piper, A. M., (1944):** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *American Geophysical Union, Transcript*. 25, pp 914-923.
- Rakotondrabe, F., Ndam, N. J. R., Mfonka, Z., Rasolomanana, H. E., Nyangono, A. A. J., Banakeng, L. A., Ako Ako, A., Rakotondrabe, H. M., (2017):** Assessment of surface water quality of Bétaré-Oya gold mining Area (East-Cameroon). *Journal of Water Resource and Protection*. 9: 960-980.
- Rakotondrabe, F., Ndam, N. J. R., Mfonka, Z., Rasolomanana, H. E., Nyangono, A.A. J., Ako Ako, A., (2017):** Water quality assessment in Bétaré-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. *Science of the Total Environnement*. 610-611 ; 831-844.
- Rodier, J., (1996) :** L'analyse de l'eau. Éd. Dunod, Paris.
- Segalen P., (1967) :** Les sols et la géomorphologie du Cameroun. Cahier ORSTOM, série pédologique Vol V n°2, pp 137-187.
- Soba D., (1989) :** La série du Lom : étude géologique et géochronologique d'un bassin volcanosédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse de doctorat d'Etat, Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 198p.
- Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A. A., Toteu, S. F., (2006) :** Pétrographie et géochimie des granitoïdes panafricains de Ngaoundéré au Centre Nord Cameroun : implications pour leurs sources et leur cadre géologique. *Journal of African Earth Sciences*. 44 (4-5): 511-529.
- Toteu, S. F., Van Schumus, W. R., Penaye, J., Michard, A., (2001):** New U-Pb and Sm-Nd data from North-Central Cameroon and its bearing on the pre-pan African history of Central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.
- Toteu, S. F., Penaye, J., Djomani, P. Y., (2004) :** Evolution géodynamique de la ceinture panafricaine en Afrique centrale avec une référence particulière au Cameroun. *Revue canadienne des sciences de la Terre* 41 (1) : 73-85.
- UN., (2023) :** Rebuilding trust and reigniting global solidarity.
- Vallerie M., (1973) :** contribution à l'étude des sols du centre sud-Cameroun ; types de différenciations morphologique et pédogénétiques sous climat sub-equatorial, 119p.
- Wirmvem Ngai N Jude., (2023):** Hydrogeochemical characterization of ground and surface water in the Eastern part of the Adamawa-Yade Domain, Bertoua-Cameroon. DOI: <http://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2541819v1>.
- WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme JMP., (2017):** Progress on drinking water, sanitation and hygiene. *Data.unicef.org> Resources*.

Yao, T. K., Oga, M-S., Fouché, O., Baka, D., Pernelle, C., Biemi, J., (2012) : Evaluation de la potabilité chimique des eaux souterraines dans le bassin versant tropical : cas du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 6:7069-7086.

Youwah Chiemie N., (2022) : Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux a Ahala-Barriere (bassin versant de la Biyeme) Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 95p

ANNEXES

Annexe 1 : Classification des eaux en fonction de leur pH

pH < 5	Acidité forte présence d'acides minéraux et organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte évaporation intense

Annexe 2 : Relation entre conductivité électrique et minéralisation (Detay 1993)

Conductivité électrique (µS/cm)	Minéralisation
< 100	Très faible
100 à 200	Faible
200 à 400	Peu accentuée
400 à 600	Moyenne
600 à 1000	Importante
> 1000	Excessive

Annexe 3 : Unités et teneurs limites des paramètres physico-chimiques et bactériologiques d'une eau de boisson selon les normes de l'OMS (2008).

PARAMETRES	UNITES	Teneur dans la ville de Bertoua 1	Limite OMS	Limite ANOR
Température	°C	/	25	0
pH	/	3,4-9,7	6.50-8.50	6,5- 9
Conductivité électrique (CE)	µS/cm	58,3-857	1500	1000
MES	mg/L	1,7-4,4	25-40	/
Chlorure (Cl⁻)	mg/L	4,86-90,1	≤ 250	≤200
Sulfates (SO₄²⁻)	mg/L	1,19-5,9	≤ 250	≤250
Nitrates (NO₃⁻)	mg/L	13,85-419,1	50	≤50
Calcium (Ca²⁺)	mg/L	0,87-24,23	≤ 500	/
Magnésium (Mg²⁺)	mg/L	0,1-5,25	125	≤50
Sodium (Na⁺)	mg/L	2,76-28,66	≤ 200	≤150
Potassium (K⁺)	mg/L	0,77-14,63	12	12
Bicarbonates (HCO₃⁻)	mg/L	0-202,09	125-130	//
Fluorure (F⁻)	mg/L	0,06-0,52	1.5	/
Ammonium NH₄⁺)	mg/L	0,01-12,06	1.5	0.5
Phosphates (PO₄³⁻)	mg/L	0-0	/	5

Coliformes fécaux (CF)	UFC/100 mL	589	0	0
Streptocoques fécaux (SF)	UFC/100 mL	330	0	0

Annexe 4 : Classe de la qualité des eaux de puits et des sources et propositions de mesures de traitement : (DjeudaTchapnga et *al.*, 1999)

CF UFC/100mL	SF UFC/100mL	Qualité des eaux	Mesure sanitaire proposée
0-20	0-20	Très bonnes	Protection simple
0-20	20-200	Assez bonnes	Contrôle des pollutions anciennes
20-200	20-200	Moyennes	Traitement facultatif (désinfection)
20-200	200-1000	Suspecte	Traitement conseillé
200-1000	200-1000	Suspecte	Traitement conseillé
200-1000	1000-5000	Médiocre	Traitement impératif
1000-5000	1000-5000	Médiocre	Traitement impératif
1000-5000	1000-5000	Mauvaise	Traitement impératif + filtration
5000-20000	5000-20000	Mauvaise	Traitement impératif + filtration
>20000		très mauvaise	Interdite en eau potable



Cours d'eau Badombé



prise des mesures piézométriques



Puit situé à proximité d'une latrine



Pont sur le cours d'eau Badombé