

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

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



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POST GRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS

**IMPACTS LITHOLOGIQUES ET ANTHROPIQUES SUR LA
QUALITÉ DES EAUX DU PETIT BASSIN VERSANT DE
CHIÉMBÛH DANS LE PLATEAU BAMOUN (OUEST-
CAMEROUN)**

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

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles

Option : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Présenté par



NJIFON TAPON AMADOU NAS

Matricule : 10R0597

Licencié ès-Sciences

Sous la direction de

MOUNDI Amidou

Maître de conférences
Université de Yaoundé I

NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy

Professeur
Université de Yaoundé I

Année académique 2023 - 2024

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

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



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POST GRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS

**IMPACTS LITHOLOGIQUES ET ANTHROPIQUES SUR LA
QUALITÉ DES EAUX DU PETIT BASSIN VERSANT DE
CHIÉMBÛH DANS LE PLATEAU BAMOUN (OUEST-
CAMEROUN)**

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

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles

Option : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Présenté par

NJIFON TAPON AMADOU NAS

Matricule : 10R0597

Licencié ès-Sciences

Sous la direction de

MOUNDI Amidou

Maître de conférences
Université de Yaoundé I

NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy

Professeur
Université de Yaoundé I

Année académique 2023 - 2024

DEDICACE

À

Mon feu père TAPON Mama et ma mère NGOUOT Ramatou

REMERCIEMENTS

Le présent travail est le fruit de la participation de plusieurs personnes et structures. C'est pourquoi il est indispensable, avant de présenter ce mémoire, d'adresser mes vifs et sincères remerciements aux personnes ressources qui ont contribué de loin ou de près à sa réalisation. Je pense en particulier :

J'exprime mon profond respect et toute ma reconnaissance aux professeurs **NDAM NGOUPAYOU Jules Remy** et **MOUNDI Amidou** pour la confiance qu'ils m'ont témoignée en acceptant de co-diriger mes travaux malgré leurs multiples occupations.

Au **Professeur NDJIGUI Paul-Désiré** chef de département des Sciences de la Terre, pour la bonne marche dudit Département. Je lui exprime par cette occasion ma grande considération.

Je tiens à dire ma reconnaissance à tout le corps enseignant du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, en occurrence les professeurs : EKO MEDJO R ; NZENTI J.P ; YONGUE FOUATEU R ; KAMGANG KABEYENTE V ; NKOUMBOU C ; TEMDJIM R ; YENE ATANGANA J.Q ; NJILAH I.K ; ONANA V.L ; TCHOUANKOUE J.P ; ABOSSOLO ANGUE M ; NGEUTCHOUA G ; EKOMANE.E ; NGO BIJECK L.M ; SABABA E ; NUMBEM J ; ainsi que les Docteurs : MOUAFO L ; LAMILEN D ; ANABA A et tous ceux dont les noms ne figurent pas sur cette liste, pour leurs précieux enseignements.

À mes frères et sœurs NGOU MEFIRE Mamouda ; POUOPABIRNA Abiba ; NTIECHA Abdel Aziz ; NJIEMESSA NJIFON Chouabou ; MBOMBO NJOYA.I ; NZIEKET Rachidetou Ladouce ; KPOUMIE Aboubakar Sidick et sa femme Fatima ; NGOU NJIKAM Abdel Aziz ; NGOU MEFIRE Mamouda et MOUMEMIE Mazou pour leurs conseils, encouragements et la solidarité qui règne entre nous.

À mes Oncles MONTA Amadou, MOUNVERA Awel, NJIFON Salifou et MOUNVERA Amadou pour leurs multiples conseils et encouragements depuis mon entrée à l'Université.

À mon grand-père feu MOUNVERA Aboubarka et mes tantes MINKO Yolande, MOUASIER Amina et GOUGOURE Pasma pour leurs différents conseils.

À tous les aînés du laboratoire, en particulier Mohomed NGAH pour son soutien inconditionnel, Abdoulail NJOUOKOUE, ZOBO MBELLE Henri, NGNATCHA YENDE. C et NDAM MOUNCHIKPOU Aoudou.

À tous mes camarades de promotions : TALLA Edmond Joseph, MOULIOM MBOUOMBOUO Arnold Steven, NDOUM Adamou Ibrahim et DIFFO Alex.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIERES	iii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES.....	vii
RESUME.....	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE ET LES TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES	3
I.1 CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN	3
I.1.1 Cadre physique	3
I.1.1.1 Situation géographique et administrative	3
I.1.1.2 Climat	4
I.1.1.3 Végétation	6
I.1.1.4 Orohydrographie	6
I.1.1.5 Géologie	8
I.1.2 Cadre humain.....	10
I.2. TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES.....	10
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES	13
II.1 Recherche bibliographique	13
II.2 Travaux de terrain	13
II.2.1 Reconnaissance et localisation du site d’étude	13
II.2.2 Choix et description des points d’échantillonnages.....	14
II.2.3 Prélèvement et conditionnement des échantillons d’eau	15
II.3. Travaux de laboratoire	16
II.3.1 Caractérisation physiographique du BVAC.....	16
II.3.2 Mesure des paramètres physiques au laboratoire.....	18
II.3.3 Traitement et conditionnement des échantillons.....	19

II.3.4 Analyses chimiques et bactériologiques des eaux	19
II.3.5 Traitement des données physico-chimiques et bactériologiques	20
CHAPITRE III : RESULTATS	22
III.1. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BVAC	22
III.1.1 Caractéristiques morphométriques	22
III.1.2 Caractéristiques hydrographiques.....	24
III.2 NIVEAUX DE VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES EAUX DU BVAC	25
III.2.1 Paramètres physiques (pH, CE, MES).....	25
III.2.2 Paramètres chimiques	26
III.3 NIVEAUX DE VARIATIONS DES PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC	28
CHAPITRE IV : ESSAI D'INTERPRETATIONS ET DE DISCUSSION.....	31
IV.1 VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC	31
IV.1.1 Paramètres physiques	31
IV.1.2 Paramètres chimiques.....	33
IV.2 VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES COLONIES BACTERIENNES DANS LES EAUX DU BVAC	39
IV.3 ANALYSE STATISTIQUE ET ORIGINES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC.....	41
IV.3.1 Matrice de Corrélation.....	41
IV.3.2 Analyse en composantes principales (ACP)	41
IV.3.4 Origines des paramètres bactériologiques dans les eaux du BVAC	45
IV.5 QUELQUES SOLUTIONS PROPOSEES POUR ATTENUER LA VULNERABILITE DES EAUX DU BVAC	47
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	49
CONCLUSION GENERALE	49
PERSPECTIVES	51
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	52
ANNEXES.....	I

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique et administrative de la zone d'étude	3
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique du Monastère de Koutaba	5
Figure 3 : Morphologie de l'arrondissement de Fouban.....	6
Figure 4 : Réseau hydrographique de la zone d'étude.	7
Figure 5 : Géologie de l'arrondissement de Fouban.	9
Figure 6 : Localisation du bassin versant amont du Chiémbùh dans le bassin versant du Nchi	14
Figure 7 : Carte de localisation des points d'échantillonnage dans le bassin versant amont du Chiémbùh.	15
Figure 8 : Unités géomorphologiques du bassin versant amont du Chiémbùh.	23
Figure 9 : Courbe hypsométrique du bassin versant amont du Chiémbùh.....	24
Figure 10 : Niveaux de variation des paramètres physiques.....	26
Figure 11 : Niveau de variation des cations majeurs et TZ^+	26
Figure 12 : Niveaux de variation des anions majeurs et TZ^-	27
Figure 13 : Niveaux de variation des éléments en traces.	28
Figure 14 : Niveaux de variation des paramètres bactériologiques.	30
Figure 15 : Variations dans l'espace et le temps du pH par types d'eaux.....	32
Figure 16 : Variations dans l'espace et le temps des matières en suspensions par types d'eaux.	33
Figure 17 : Variations dans l'espace et le temps de la conductivité électrique par types d'eaux.	33
Figure 18 : Variations dans l'espace et dans le temps des teneurs en TZ^+ et TZ^- par types d'eaux.	35
Figure 19 : Proportions moyennes des éléments chimiques dans les eaux du bassin versant amont du Chiémbùh.	38
Figure 20 : Diagramme de Piper (1944) des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh	39
Figure 21 : Variations spatio-temporelles des colonies bactériennes par type d'eau dans le bassin versant amont du Chiémbùh.....	40
Figure 22 : Projection des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh sur le plan factoriel axe1-axe2 de l'ACP (plan factoriel F1 – F2)..	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Valeurs moyennes mensuelles et annuelles de précipitations, et températures (2004-2020) et indice d'aridité de la ville de Foumban	4
Tableau 2 : Points de prélèvements des eaux dans le bassin versant amont du Chiémbùh	15
Tableau 3 : Paramètres physiographiques du bassin versant amont du Chiémbùh.	23
Tableau 4 : Eléments caractéristiques de l'hypsométrie du bassin versant amont du Chiémbùh	24
Tableau 5 : Caractéristique du réseau hydrographique du bassin versant amont du Chiémbùh.	25
Tableau 6 : Niveau de variations des paramètres physiques des eaux du BVAC.....	25
Tableau 7 : Niveaux de variation des paramètres chimiques des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh.	29
Tableau 8 : Niveaux de variation des paramètres bactériologiques des eaux du BVAC.....	29
Tableau 9 : Comparaison des résultats de la qualité physicochimiques des eaux de surface de cette étude à ceux des travaux antérieurs.	36
Tableau 10 : Origine de la pollution des eaux de sources et de puits dans le BVAC selon le rapport coliforme fécaux/streptocoques fécaux. ($R = CF/SF$)	40
Tableau 11 : Matrice de corrélation entre les variables étudiées dans le bassin versant amont du Chiémbùh.	42
Tableau 12 : Composantes principales des paramètres hydrochimiques du BVAC.....	43
Tableau 13 : Classe de la qualité des eaux de puits et des sources et propositions de mesure de traitement.....	48

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

ANOR	: Agence des Normes et de la qualité du Cameroun
BUCREP	: Bureau Central de Recensements de la Population du Cameroun
BVAC	: Bassin Versant Amont du Chiémbùh
CAMWATER	: Cameroon Water Utilities Corporation
CE	: Conductivité Electrique
DMN	: Données Météorologiques Nationales
GPS	: Global Positioning System
IRGM	: Institut de Recherche Géologique et Minière
LAGE	: Laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux
Mt	: Mont
OMS	: Organisation Mondiale de la Santé
ONG	: Organisation Non Gouvernementale
pH	: Potentiel d'Hydrogène
SIG	: Système d'Information Géographique
UFC	: Unité Formatrice des Colonies
WRU	: WasteWater Research Unit

RESUME

La variabilité et/ou le changement climatiques associés aux activités anthropiques sont à l'origine de la dégradation des eaux et de leur disponibilité quantitative et qualitative à l'échelle du globe en général et en Afrique sub-saharienne en particulier. C'est dans ce contexte que la présente étude se propose d'évaluer les impacts lithologiques et anthropiques sur la qualité des eaux du bassin versant amont du Chiémbeh (BVAC) à Foumban (Ouest-Cameroun). Pour ce faire, outre une recherche bibliographique, des travaux sur le terrain et en laboratoire ont été effectués comme suit : la mesure in-situ des paramètres physico-chimiques, le prélèvement des eaux en saison sèche (février) et de pluie (août) durant l'année hydrologique, la caractérisation physiographique et l'analyse des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux du BVAC. Il en ressort que : sur le plan physiographique, le BVAC a une superficie de 28,55 km², un périmètre de 24,75 km et un indice de compacité de 1,30 lui conférant une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent de longueur 9,35 km et de largeur 3 km. Le cours d'eau Chiémbeh qui draine ce bassin s'écoule du nord-ouest vers le sud-est pour se déverser dans la rivière Mfû après un parcours d'environ 18 km. Sur le plan physico-chimique, les eaux du BVAC sont acides ($4,38 \leq \text{pH} \leq 6,35$), faiblement à très faiblement minéralisées ($7,6 \leq \text{CE} \leq 180,2 \text{ } \mu\text{S/cm}$, $124,60 \leq \text{TZ}^+ \leq 1346,65 \text{ } \mu\text{eq/l}$) avec un faciès hydrochimique : bicarbonaté calci-magnésien. Cela s'explique par son substratum lithologique plutono-metamorphique et une couverture pédologique épaisse ferralitique. Les analyses statistiques (matrice de corrélation et ACP) mettent en évidence deux processus hydrochimiques à l'origine de la minéralisation des eaux : (i) l'interaction eau-roche et ; (ii) les activités anthropiques. La présence des coliformes et streptocoques fécaux, traduit une pollution fécale d'origine animale. Les concentrations en colonies bactériennes sont élevées en saison sèche dans les puits et en saison de pluie dans les sources. Ces eaux respectent dans l'ensemble les normes prescrites par l'OMS et l'ANOR à l'exception de certains paramètres (pH, NO_3^- , CF et SF) et peuvent être utilisées dans d'autres domaines d'activités (agricole, élevage, ménage). Mais un traitement préalable est nécessaire avant toute consommation humaine.

Mots clés : Foumban, Ouest-Cameroun, hydrochimie, bactériologie, vulnérabilité, facteurs environnementaux.

ABSTRACT

Climate variability and/or change associated with anthropogenic activities are at the root of water degradation and quantitative and qualitative availability on a global scale in general, and in sub-Saharan Africa in particular. It is in this context that the present study aims to assess the lithological and anthropogenic impacts on water quality in the upstream Chiémbeh watershed (BVAC) at Foumban (West Cameroon). To achieve this, in addition bibliographical research, field and laboratory work has been carried out, including: in-situ measurement of physico-chemical parameters, water sampling during the dry (February) and rainy (August) seasons hydrology, physiographic characterization and analysis of physico-chemical and bacteriological parameters of BVAC waters. In physiographic terms, the BVAC has a surface area of 28.55 km², a perimeter of 24.75 km and a compactness index of 1.30, giving it an elongated shape similar to an equivalent rectangle, 9.35 km long and 3 km wide. The Chiémbeh stream, which drains this basin, flows from northwest to southeast, emptying into the Mfû river after a journey of around 18 km. Physico-chemically, the waters of the BVAC are acidic ($4.38 \leq \text{pH} \leq 6.35$), weakly to very weakly mineralized ($7.6 \leq \text{CE} \leq 180.2 \mu\text{S/cm}$, $124.60 \leq \text{TZ}^+ \leq 1346.65 \mu\text{eq/l}$) with a hydrochemical facies: bicarbonate calci-magnesian. This is explained by its plutono-metamorphic lithological substratum and thick ferrallitic soil cover. Statistical analyses (correlation matrix and PCA) highlight two hydrochemical processes responsible for water mineralization: (i) water-rock interaction and (ii) anthropogenic activities. The presence of fecal coliforms and streptococci indicates fecal pollution of animal origin. These bacterial colonies are elevated in the dry season in wells and in the rainy season in springs. On the whole, this water complies with WHO and ANOR standards, except for certain parameters (pH, NO₃⁻, CF and, SF) and can be used for other purposes (agricultural, livestock, domestic). But a preliminary treatment is necessary before any human consumption.

Keywords: Foumban, West Cameroon, hydrochemistry, bacteriology, vulnerability, environmental factors.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource très importante pour la durabilité de la vie et de l'environnement. Cette ressource qui occupe environ 70% de la surface du globe est constituée à 97,5% par les eaux salées et le reste des 2,5% par les eaux douces (Banton et Bangoy, 1997). Ces eaux douces sont réparties principalement en : glaciers et couverture neigeuse (1,74 %) ; eaux souterraines (1,69 %) ; lacs et rivières (0,02 %). Elles sont généralement utilisées dans plusieurs domaines d'activité notamment l'irrigation, l'industrie, l'énergie et l'alimentation en eau potable (AEP), en particulier dans les pays en développement.

Au cours des deux dernières décennies, de nombreux pays à travers le monde, en occurrence ceux d'Afrique subsahariennes se trouvent au centre des débats sur l'environnement et la gestion durable des ressources en eau. Ces ressources sont soumises à plusieurs pressions (activités anthropiques et changements climatiques) qui les dégradent tant du point de vue quantitatif que qualitatif ceci à cause de la croissance démographique et du développement socio-économique (UNESCO, 2019 ; Houemenou, 2020). Ces dégradations sont amplifiées par l'urbanisation anarchique, l'agriculture, les activités minières auxquelles s'associent la variabilité et/ou le changement climatique.

Le Cameroun, comme la plupart des pays d'Afrique en voie de développement, n'est pas épargné par cette situation. Malgré qu'il dispose d'une importante quantité des ressources en eau due à sa position géographique, elles sont inégalement réparties entre : le Nord et le Sud, le milieu rural et le milieu urbain et enfin, la zone de socle et la zone sédimentaire (Sighomnou, 2004). La zone de socle représente environ 90 % du territoire national contre 10% pour les zones sédimentaires (MINEE, 2009).

Le bassin versant amont du Chiémboh est situé dans le plateau Bamoun (région de l'Ouest-Cameroun) en zone de transition forêt-savane en plein essor démographique. Il existe des réseaux d'adduction d'eau du service national à l'instar de la CAMWATER au centre du bassin versant amont du Chiémboh. Dans le reste du bassin, les populations locales font recours aux ressources en eau souterraine (puits aménagés ou non aménagés, sources et forages) et de surfaces (pluie et rivières) pour leur approvisionnement, et dont les caractéristiques physico-chimique et même bactériologique restent mal ou très peu connues. Ces ressources en eau sont à l'origine de nombreuses maladies hydriques marquées par des résurgences épidémiologiques (choléra, dysenterie, fièvre typhoïde...) qui concourent et de manière considérable à la paupérisation des populations en termes de santé et d'économie (Mfonka et al., 2015).

Plusieurs travaux ont été effectués en hydrologie, hydrogéochimie, hydrogéologie pour une meilleure évaluation (quantitative et qualitative) des ressources en eau du plateau

Bamoun au cours de ces dernières années. On peut citer entre autres les travaux de : Tita (2008) sur le bassin du Nkoup à Foumbot ; Mbouobda (2014) sur le Panké ; Mfonka et al. (2015) sur le bassin du Nchi à Foumban ; Nsangou (2017) sur le bassin du Mfu à Foumban ; Mouncherou et al. (2018) dans les localités de Foumbot ; Mfonka et al. (2019) dans la localité de Foumban ; Ngnatcha (2019) sur le bassin versant du Ngouoh-Ngouoh à Foumbot ; Njumbimepouendi (2019) dans la localité de Njimom ; Foppa (2020) sur le bassin versant du Mazam à Koutaba ; Mfonka et al. (2021) dans le plateau Bamoun ; Njouenkou (2022) sur le bassin versant du Nja amont à Koutaba. En dépit de tous ces travaux sus-évoqués, on constate qu' il n'existe pas une réelle étude effectuée sur la qualité de l'eau du bassin versant amont du Chiémbùh, d'où l'intérêt de la présente étude. Le présent travail a pour objectif principal l'évaluation de l'impact de la lithologie et des activités anthropiques sur les ressources en eau du bassin versant amont du Chiémbùh.

Les objectifs spécifiques sont :

- déterminer les caractéristiques physiographiques du bassin versant amont du Chiémbùh ;
- évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines et de surface de ce bassin ;
- déterminer les sources lithologiques, anthropiques et les facteurs environnementaux qui influencent la qualité des eaux dans le BVAC ;
- proposer quelques solutions pour atténuer la vulnérabilité des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh.

Ce travail qui débute par une introduction générale et s'achève par une conclusion générale et des perspectives s'articule autour de quatre chapitres :

- le premier chapitre présente la zone d'étude et les travaux antérieurs complémentaires effectués ;
- le deuxième chapitre présente le matériel et les méthodes utilisées pour la collecte des données sur le terrain et leur traitement en laboratoire ;
- le troisième chapitre ressort les résultats obtenus à l'issue des travaux de terrain et de laboratoire ;
- enfin, le chapitre quatre est axé sur l'interprétation et la discussion des différents résultats ainsi obtenus.

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

Introduction

Ce chapitre présente le cadre physique et humain de l'arrondissement de Foumban, ainsi que les travaux antérieurs effectués en géosciences et hydrosciences dans le plateau Bamoun.

I.1 CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN

I.1.1 Cadre physique

I.1.1.1 Situation géographique et administrative

L'arrondissement de Foumban qui est la zone retenue pour le présent travail, est situé dans la région de l'Ouest Cameroun et plus précisément dans le département du Noun. Il s'étend entre les latitudes 5°3'30'' et 6°4'30'' Nord et les longitudes 10°39' et 11°10' Est. Cette zone occupe un espace territorial d'environ 418 km² (PCD, 2011) et fait partie des neuf arrondissements que compte le département du Noun. L'arrondissement de Foumban est limité à l'est par les communes de Malantouen et Njimom, à l'ouest par la commune de Bangourain et au sud par les communes de Koutaba, Massagam et Foubot (Figure 1).

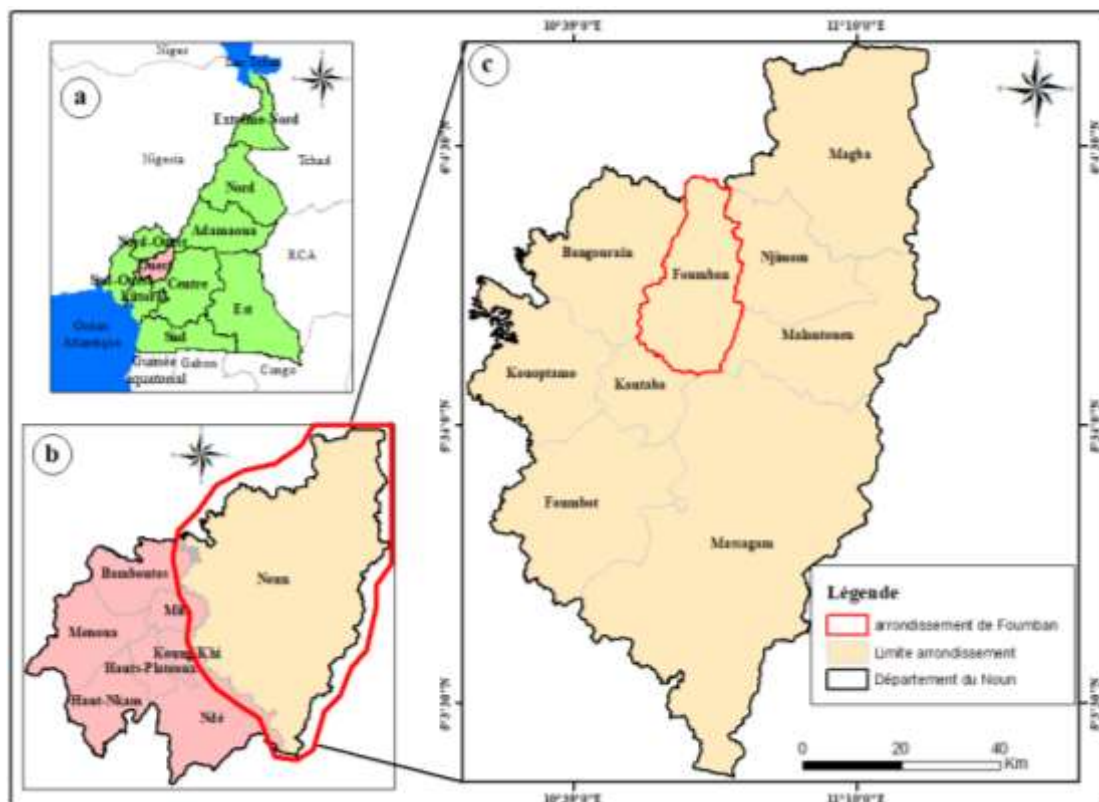


Figure 1 : Situation géographique et administrative de la zone d'étude : a) région de l'Ouest dans le Cameroun ; b) département du Noun dans la région de l'Ouest ; c) zone d'étude dans le département du Noun.

I.1.1.2 Climat

Les données recueillies à la station météorologique du monastère de koutaba ont permis de caractériser le climat de Foumban et ses environs. Les paramètres pris en comptes sont les précipitations et la température (2004-2020).

I.1.1.2.1 Précipitations

La pluviométrie est le paramètre hydroclimatique qui joue le rôle majeur dans l'évolution des écosystèmes de la région (Tsalefac, 1991). La hauteur moyenne interannuelle des précipitations de la ville de Foumban et ses environs est de 1902,3 mm pour la période comprise entre 2004-2020 (16 ans). Le mois de septembre est le plus pluvieux avec 322,5 mm de pluie et le mois de janvier le plus sec avec 6,8 mm de pluie. Le climat est de type tropical humide montagnard (Mfonka et al., 2021) avec deux saisons contrastées composées d'une longue saison des pluies de 9 mois (mars à novembre) et d'une courte saison sèche de 3 mois (décembre à février).

I.1.1.2.2 Température

La température moyenne mensuelle interannuelle est de 21,5°C (DMM, 2020) pour la période 2004-2020. Le mois le plus chaud est celui de février (23,7°C) et le mois de juillet est le moins chaud (20,4°C) (Tableau 1).

Tableau 1 : Valeurs moyennes mensuelles et annuelles de précipitations, et températures (2004-2020) et indice d'aridité de la ville de Foumban (Source : Données Météorologiques Nationales du Monastère de Koutaba (2004-2020))

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy/S
P(mm)	6,8	23,5	117,8	139,0	196,1	178,2	286,6	286,6	322,5	266,8	71,3	7,1	1902,3
T(°C)	21,6	23,7	23,2	22,6	22	21,2	20,4	20,5	20,6	20,8	20,7	20,7	21,5
I _a	2,58	8,49	41,9	51,16	73,54	68,54	113,13	112,76	126,47	103,95	27,87	2,77	61,41

Légende P : Précipitation, **T** : Température, **I_a** : Indice d'aridité, **M_a** : Moyenne annuelle, **S** : somme

I.1.1.2.3 Indice d'aridité de DE Martonne

L'indice d'aridité de DE Martonne (1942) noté I_a, est un paramètre permettant de distinguer les mois considérés secs de ceux considérés comme humides pendant une période donnée. Il est donné par la relation suivante :

$$I_a = (12 \times P_m) / (T_m + 10) \quad \text{avec ;}$$

Ia : Indice d'aridité de Martonne ; Pm (mm) : Précipitations moyennes mensuelles ; Tm (°C) : Températures moyennes mensuelles.

Selon DE Martonne :

- si $Ia < 20$, le mois est considéré comme sec ;
- si $20 < Ia < 50$, le mois est dit sub-sec ;
- si $Ia > 50$, le mois est considéré comme humide.

Pour la période allant de 2004 à 2020, les mois de décembre, janvier, février, sont considérés comme sec, les mois de mars et novembre sont considérés sub sec, tandis que les mois d'avril, mai, juin, juillet, août, septembre et octobre sont des mois humides (Tableau 1).

I.1.1.2.4 Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)

Ce diagramme obtenu à partir des données pluviométriques (en mm) et thermiques (°C) d'une région donnée permet de distinguer les mois secs, des mois humides.

Un mois est dit sec si la pluie moyenne mensuelle obtenue pendant ce mois est inférieure au double de la température obtenue pendant le mois considéré ($P < 2T$). Selon ce diagramme (Figure 2), les mois de décembre, janvier, et février sont des mois secs tandis que les mois de mars, avril, mai, juin, juillet, août, septembre, octobre et novembre sont humides.

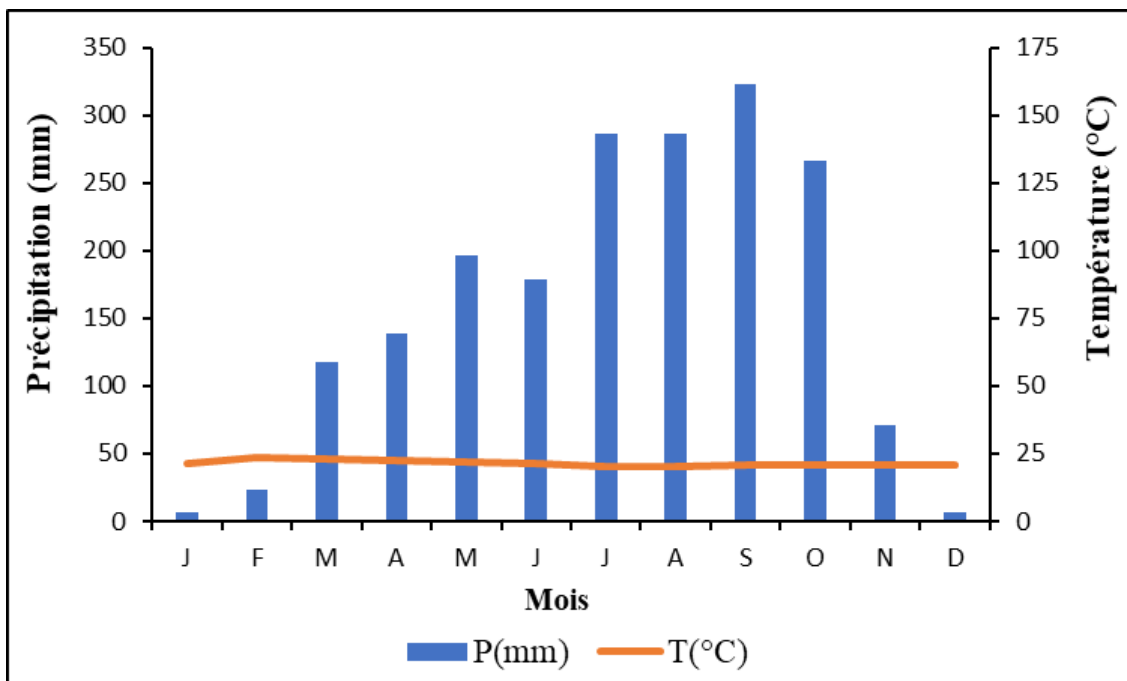


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station météorologique du Monastère de Koutaba (2004-2020).

I.1.1.3 Végétation

La végétation rencontrée est une savane malgré la présence des reliques et des recrus forestiers (Moupou, 1999). Autour de la ville de Foumban, on observe une savane arbustive, avec récurrence de conifères (Sapins, Pinus, etc.), des « Eucalyptus Saligna », et des galeries forestières le long des cours d’eaux. Les espèces telles que le babobab, l’acacia, le tamarinier, les avocats, les manguiers, les pruniers, les raphias, palmiers à huile et le karité s’observent dans les zones habitées. La poussée démographique et l’extension des terres pour la pratique des activités agricoles, ont fait reculer progressivement la savane naturelle observée dans le périmètre urbain sous l’action de l’homme, pour laisser place à des zones complètement urbanisées (PCD, 2011).

I.1.1.4 Orohydrographie

I.1.1.4.1 Orographie

Le relief de Foumban est caractérisé par des collines, des plaines et les plateaux. On y distingue une multitude d’éléments morphologiques avec des altitudes comprises entre 800 et 1500 m (Figure 3). Une morphologie peu variable autour de 1200 m est rencontrée dans l’arrondissement de Koutaba et ses environs.

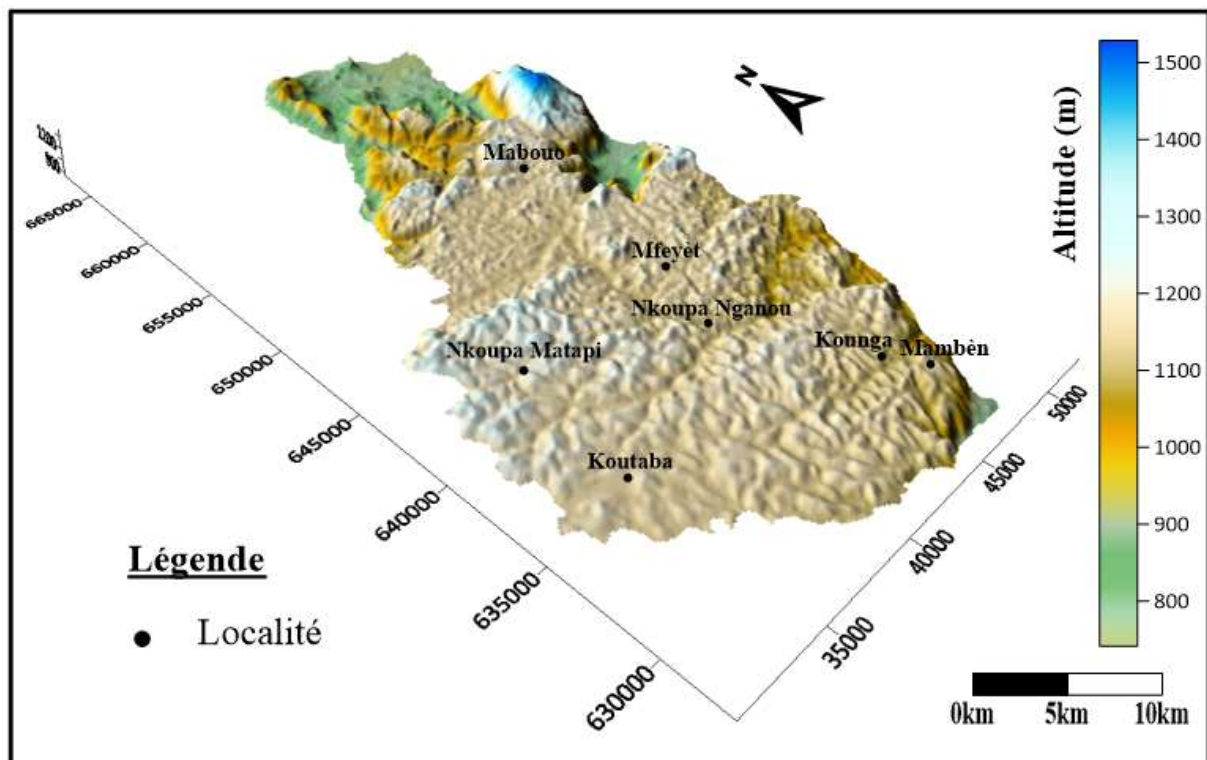


Figure 3 : Morphologie de l’arrondissement de Foumban.

I.1.1.4.2 Hydrographie

La zone d'étude appartient au bassin versant du Nchi. Ce dernier est drainé par le cours d'eau Nchi, principal affluent en rive droite du Mbam qui est lui-même le principal affluent en rive droite de la Sanaga (Figure 4). Le Nchi prend sa source aux pieds du massif du Mbam, dans le village Mbangambi (arrondissement de Bangourain). Il s'écoule suivant la direction du nord-ouest vers le sud-ouest vers l'exutoire. Les principaux affluents en rive droite du Nchi sont : le Mfû, le Matom, le Nsu et le Chou. Le Mfû draine l'arrondissement de Koutaba et une bonne partie de l'agglomération de Fouban, plus particulièrement le village Koundoum. Ces principaux affluents en rive droite sont : Mfa, Ngoko, Mendep et le principal affluent en rive gauche est le Chiémboh.

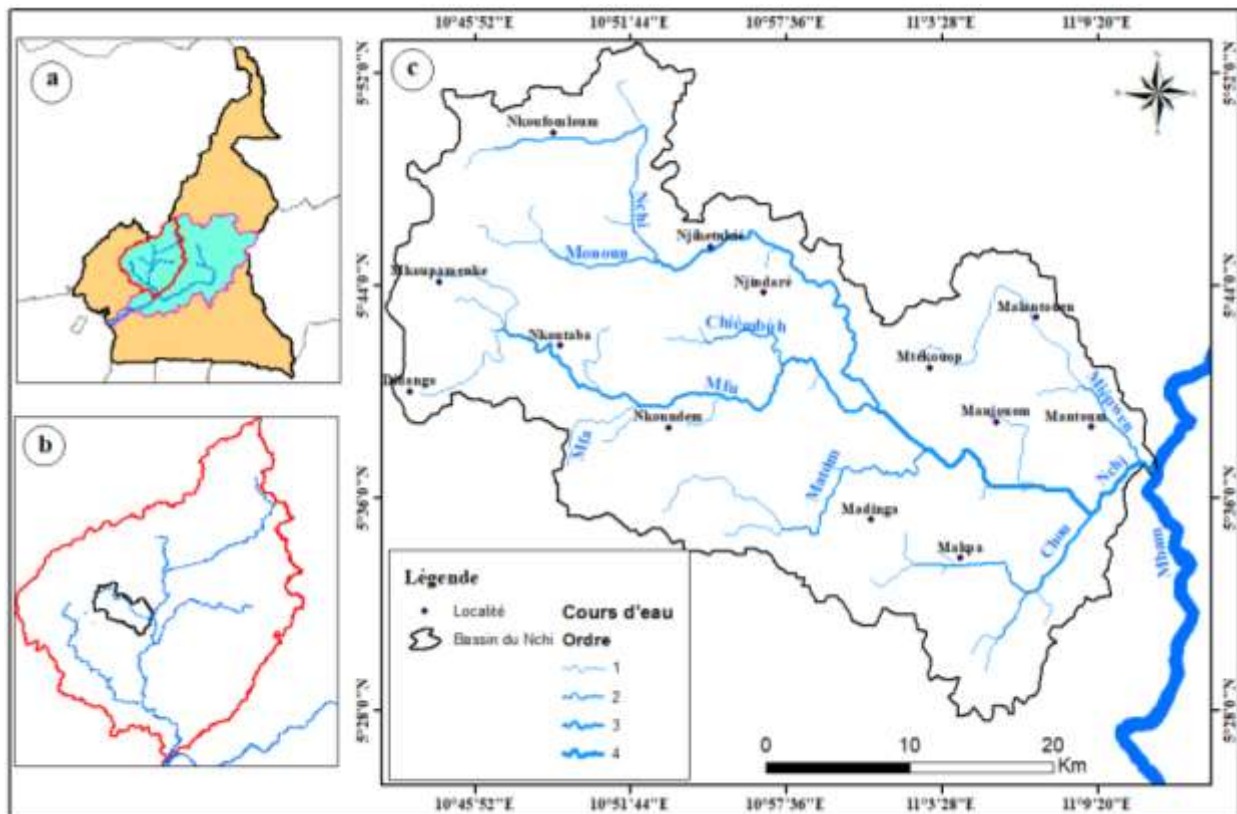


Figure 4 : Réseau hydrographique de la zone d'étude : a) bassin versant du Mbam dans le bassin versant de la Sanaga ; b) bassin versant du Nchi dans le bassin versant du Mbam ; c) bassin versant du Nchi

I.1.1.5 Géologie

I.1.1.5.1 Type de roche

Les formations géologiques rencontrées dans la ville de Foumban sont relativement celles du Plateau Bamoun. Cette ville est située dans la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) et repose sur un socle lithologique cristallin-cristallophyllien d'âge précambrien constitué de roches plutoniques (granites d'anatexie et syntectonique) et/ou métamorphiques (orthogneiss, mylonite, gneiss à biotite et amphibole,) sur lesquelles sont localisées des épanchements volcaniques constitués pour la plupart des basaltes de plateau (Wandji, 1995 ; Moundi et al., 2007 ; Wandji et al., 2008 ; Mouncherou, 2016).

Les travaux de Njonfang (2007) et Mouncherou (2013), montrent que le secteur de Foumban nord est constitué de gneiss à grenat et de gneiss à amphibole sur lesquels reposent des basaltes à olivine et des basaltes sans olivine. Tandis que le secteur Foumban est et une partie du sud-ouest, est constitué des basaltes microlitiques et microlitiques-porphyriques, des orthogneiss et des mylonites.

La prédominance de la zone d'étude par les orthogneiss indifférenciées, les granitoïdes et orthogneiss granitiques, et les gneiss migmatitiques indique la présence des roches plutono-métamorphiques (Figure 5).

I.1.1.5.2 Types de sols

La zone d'étude est dominée par quatre variétés de sols : les sols ferralitiques, les sols hydromorphes, les sols peu évolués et les sols à minéraux bruts (Njoya, 2007).

- Sols ferralitiques

Ces sols sont évolués et épais développés sur le socle cristallin et cristallophyllien ou sur basaltes anciens. Selon la minéralogie, ils sont constitués de kaolinite, d'hydroxyde de fer et d'alumine. Ils sont peu à moyennement désaturés en éléments alcalins, avec un pH souvent compris entre 5 et 6. En fonction de la roche mère, on distingue : les sols indurés qui forment la grande étendue cuirassée qu'on rencontre à Foumban et Koutié. Les sols ferralitiques rouges argilo-sableux développés sur roches acides cristallines et cristallophylliennes.

- Sols hydromorphes

Ce sont des sols marécageux gorgés d'eau, retrouvés dans les bas-fonds. Ils sont caractérisés par une forte accumulation de matière organique. Ce sont des sols noirs, mal drainés, à forte porosité et à pH acide.

- Sols peu évolués

Ce sont des sols d'apport récent, très fertiles développés sur roches volcaniques, formés sur cendre noir, sablo-limoneux, grumeleux et fins. D'épaisseur généralement faible (20-50 cm), ils sont constitués d'un mélange d'argiles de type smectite, kaolinite, d'oxydes et hydroxydes d'alumine. Ils sont peu cohérents en surface.

- Sols à minéraux bruts

Ce sont des sols non climatiques qui résultent de l'altération et de l'érosion des granites, migmatites et rhyolites).

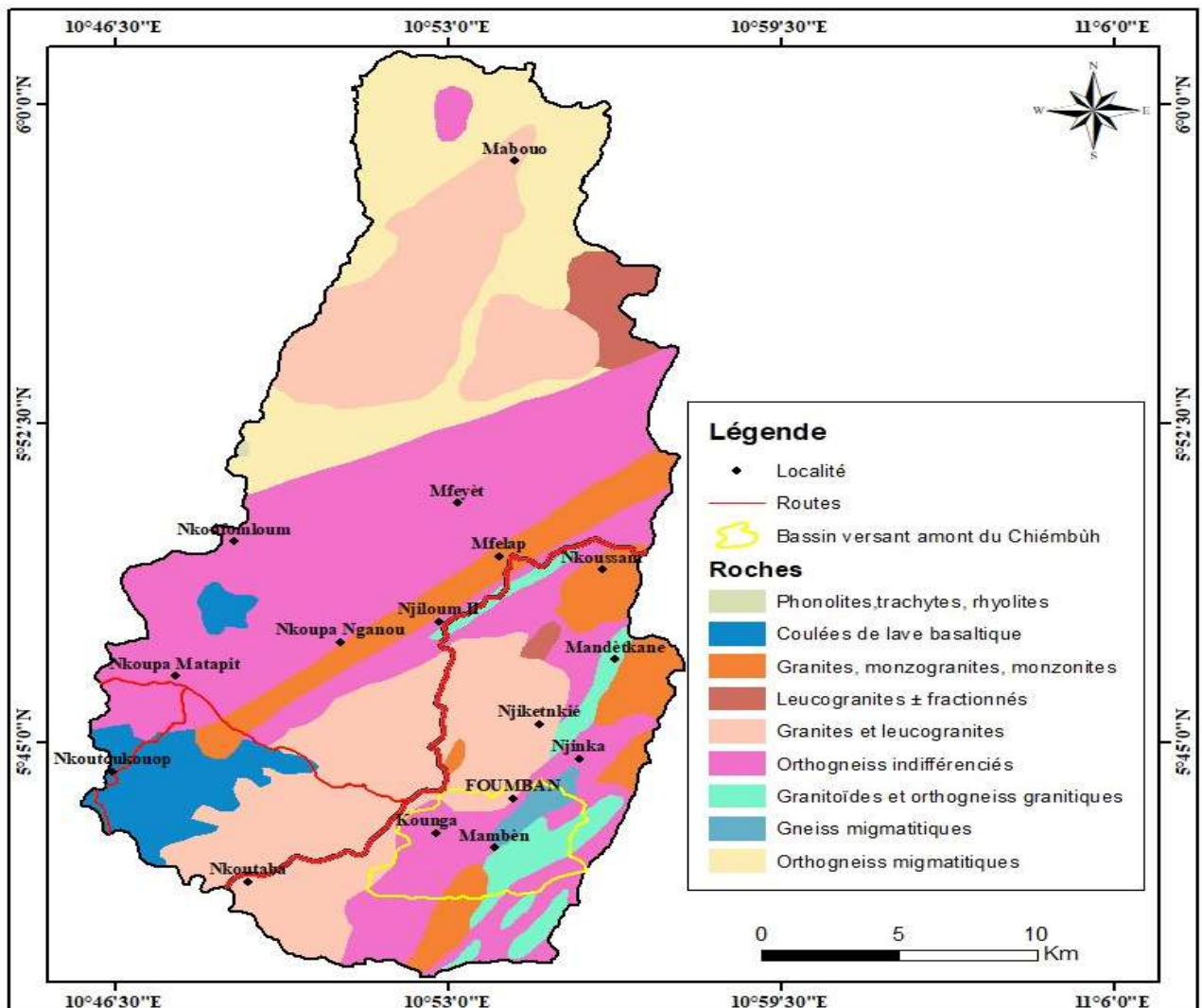


Figure 5 : Géologie de l'arrondissement de Foumban (Source : extrait de la carte géologique de reconnaissance du Cameroun Feuille N° : NB 32 SE-E29 (B. LEROY, 1959)).

I.1.2 Cadre humain

I.1.2.1 Population

D'après le recensement effectué en 2005 par le BUCREP, la population de l'arrondissement de Foumban est estimée à 152 728 habitants. Parmi ces populations, 97 904 habitants résident en zone urbaine et 54 824 habitants en zone rurale. Cette zone dispose d'un mélange de tribu constitué essentiellement des bamoun (autochtones), des bamiléks, des anglo-saxons et les soudanais à l'instar des bororos, des foubés, et des haoussas. On note aussi la présence des étrangers venus d'autres pays tels que : des nigériens, des nigériens, des arabes, des maliens, qui vivent en harmonie avec les populations locales.

I.1.2.2. Activités socio-économiques

Les activités socio-économiques font références à : l'agriculture, l'élevage, le commerce, l'artisanat et le tourisme. L'agriculture constitue l'activité principale des populations de l'arrondissement de Foumban. Les principales cultures pratiquées sont vivrières (maïs, haricots, banane-plantain, manioc, pommes de terre, etc.) et maraichères (carottes, choux, haricot vert, morelle noir, etc.). Le tourisme est aussi une importante activité génératrice de revenus avec de nombreux sites tels que le palais des Rois Bamoun et le musée des Rois Bamoun.

I.2 TRAVAUX ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES

Plusieurs travaux ont été effectués en géosciences et hydrosciences dans les bassins versants du plateau Bamoun.

En pédologie, Olivry (1978) et Njoya (2007) ont procédé à l'étude des sols de la vallée du Noun et y ont répertorié la présence de quatre types de sols : sols à minéraux bruts, sols peu évolués, sols hydromorphes et sols ferralitiques.

En pétrologie, géochimie et géochronologie, Kamgang (1986) a apporté une contribution à l'étude géochimique et pétrologique du massif de Nkogham. Moluh (1999) a apporté une contribution à l'étude pétrographique des basaltes fissuraux du secteur Foumban-est. Moundi (2004), Moundi et al. (2007) ont fait une étude sur la pétrologie, la géochimie et la géochronologie des basaltes des plateaux du plateau Bamoun et leurs implications sur les sources du magma, leurs contextes et évolutions géodynamique. Njonfang, (2007) a étudié les éléments en trace dans les sédiments, les sols et les plantes comestibles dans le bassin versant du Noun dans le cadre de la gestion géochimique de l'environnement. Okomo Atouba et al. (2016) ont étudiés la géochimie et la géochronologie des roches mafiques du plateau Bamoun.

En hydrologie, hydrochimie et hydrogéologie, Nouvelot (1971) a fait une étude en hydrologie sur le bassin supérieur du Noun. Tita (2008) a évalué la pollution des eaux du bassin du Nkoup à Foumbot et son impact environnemental. Tapon (2011) a mené une étude sur la variabilité hydro-climatique et physico-chimique des eaux d'écoulement du bassin versant de la Mapé à Magba. Mouncherou et al. (2011) ont fait une étude sur les paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du plateau Bamoun. Mbouobda, (2014) a évalué les caractéristiques physiographiques et hydrogéochimiques d'un système hydrologique en milieu volcanique (cas du bassin versant du panké). Les travaux de Mfonka et al. (2015) ont étudié l'hydrochimie et la potabilité des eaux du bassin versant du Nchi et montrent que ces eaux sont acides et faiblement à très faiblement minéralisées. Njinwouo (2016) a étudié l'hydrologie et la qualité physico-chimique des eaux du Noun à Bayomen. Nsangou (2017) a identifié les ressources en eaux dans le bassin versant du Mfu et a évalué leur vulnérabilité à travers une étude de leur qualité physico-chimique et bactériologique. Mouncherou et al. (2018) ont évalué la vulnérabilité des aquifères de la plaine volcanique du Noun aux activités agricoles. Mfonka et al. (2019) ont étudié le comportement l'hydrodynamique et la vulnérabilité de l'aquifère d'altérité dans la ville de Foumban, Nfochivé et al. (2020) ont fait allusion au phénomène de suspension des sédiments au cours de la dynamique fluviale. Mfonka et al. (2021) ont réalisés une étude sur la qualité des eaux du plateau Bamoun à l'aide d'une approche de modélisation hydrogéochimique et d'analyse statistique multivariée. Il en ressort de tous ces travaux que, la qualité des eaux superficielles et souterraines de la ville de Foumban et ses environs est influencée par les facteurs naturels (interaction eau-roche) et les facteurs anthropiques tels que : les rejets incontrôlés d'effluents liquides et solides de toutes sorte, et la forte urbanisation.

Résumé

La ville de Foumban est la zone retenue pour la présente étude. Elle est située dans la région de l'Ouest-Cameroun, plus précisément dans le département du Noun entre les latitudes 5°3'30'' et 6°4' 30'' N et les longitudes 10°39' et 11°10' E. Son climat est de type humide de montagne de l'ouest à deux saisons contrastées avec une dominance de pluie. La végétation est dite de transition entre la savane du nord et la forêt du sud avec une faune diversifiée. Le relief de la ville de Foumban est caractérisé par des plaines, des plateaux et des montagnes dont l'ensemble offre un paysage ondulé. Le Nchi (affluent en rive droite du Mbam) est le collecteur principal. Son principal affluent en rive droite est le Mfû, lui-même grossi en rive gauche

principalement par le Chiémbùh. La géologie de la zone d'étude est constituée des formations du socle d'âge précambrien (ensemble granito-gneissique) et partiellement couvert des roches volcaniques de diverses origines. On y rencontre plusieurs variétés de sols (sols ferrallitiques, sols hydromorphes, sols peu évolués et sols à minéraux bruts). La population est constituée essentiellement des Bamoun (majoritairement), des Bamilékés, des anglo-saxons et des soudanais à l'instar des bororos, des foubés, et des haoussas. L'agriculture est la principale activité de cette population.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Introduction

Ce chapitre présente de façon exhaustive le site retenu pour la présente étude ainsi que l'approche méthodologique adoptée. Cette dernière a consisté à la recherche bibliographique, aux travaux de terrain et de laboratoire.

II.1. Recherche bibliographique

Cette étape a consisté à effectuer une synthèse des travaux antérieurs déjà réalisés dans la zone d'étude (arrondissement de Foumban) et ses environs, mais aussi ceux réalisés dans les sites ayant le même contexte géologique et géomorphologique. Les documents cartographiques, les images satellitaires, ainsi que les photos aériennes de la zone d'étude ont été également consultés.

II.2. Travaux de terrain

Les travaux de terrain ont consisté à la reconnaissance et la localisation du site d'étude, aux choix et à la description des points d'échantillonnage, au prélèvements et conditionnement des échantillons d'eau pour le laboratoire.

II.2.1. Reconnaissance et localisation du site d'étude

Une campagne de reconnaissance du site d'étude (BVAC) a été effectuée en février 2022. Elle avait pour but d'évaluer l'ensemble des difficultés afin d'avoir une idée sur les travaux à effectuer et se familiariser avec le terrain. Cette campagne a permis aussi de recenser tous les ouvrages hydrauliques, cours d'eau du BVAC et ses affluents.

Le site retenu pour la présente étude est le bassin versant amont du Chiémbùh (BVAC). Il est situé dans le département du Noun (Ouest-Cameroun) entre les latitudes 5°41' et 5°44' N et les longitude 10°52' et 10°55'E. Le cours d'eau Chiémbùh est le collecteur principal de ce bassin et s'écoule suivant la direction nord-ouest vers le sud-est (Figure 6). Ce dernier arrose les quartiers tels que : Mambèn, Kounga, Njissé, Njimban, etc.

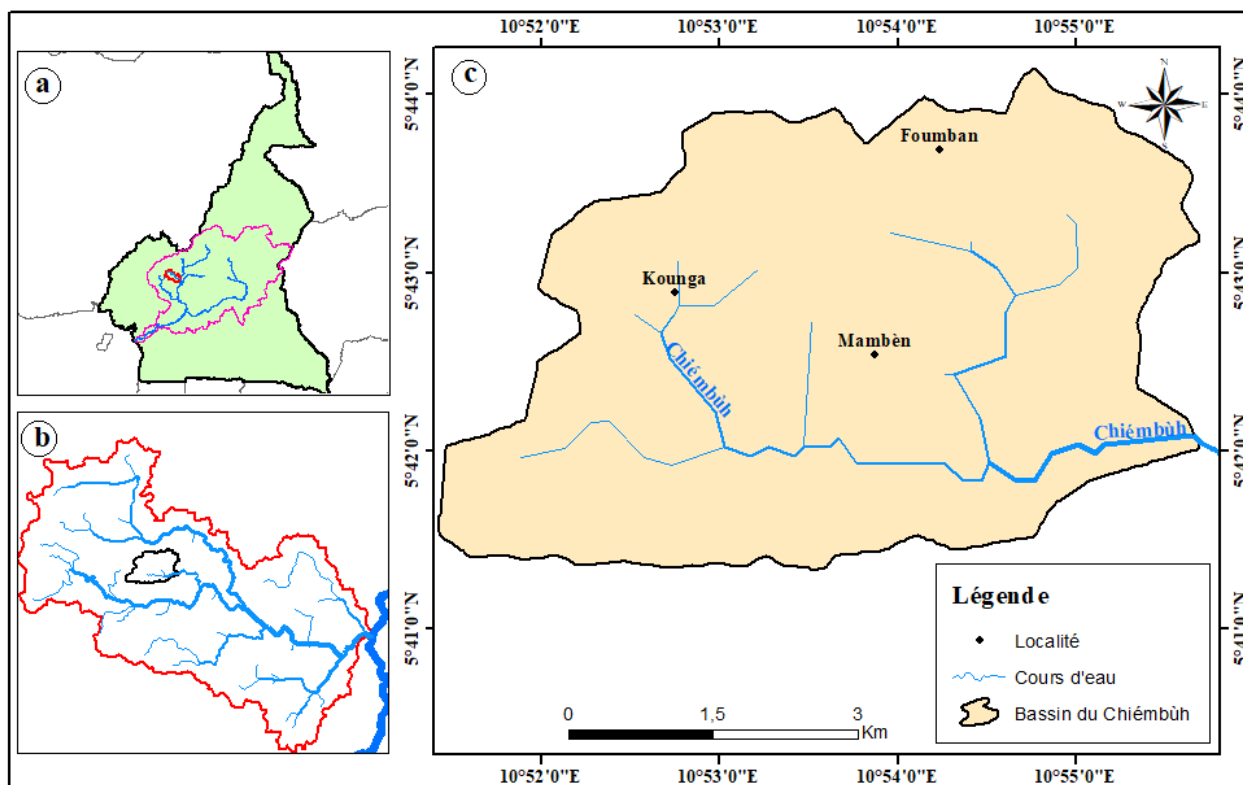


Figure 6 : Localisation du bassin versant amont du Chiémbeh : a) bassin versant du Nchi dans le bassin versant de la Sanaga ; b) bassin versant amont du Chiémbeh dans le bassin versant du Nchi ; c) bassin versant amont de Chiémbeh

II.2.3. Choix et description des points d'échantillonnages

Les prélèvements d'échantillons d'eau se sont effectués en fonction des critères suivants :

- les types d'eau : souterraines (forages, puits et sources) et d'écoulement (rivière chiémbeh) ;
- le taux de fréquentation et la densité des populations autour des points d'eau pour évaluer l'influence anthropique ;
- l'accessibilité facile et l'accord des propriétaires des ouvrages ;
- le type de formation drainés par ces eaux en vue d'identifier l'influence de la lithologie.

Sept points de prélèvement ont été retenus (deux sources, deux forages, deux puits et un cours d'eau) pour les analyses chimiques et deux ouvrages hydrauliques (deux sources et deux puits) pour les analyses bactériologiques. Les coordonnées géographiques de ces points obtenues à l'aide d'un GPS (Global Positionning System) de marque German sont présentées dans le Tableau 2. La cartographie des points d'échantillonnage est illustrée par la figure 7.

Tableau 2 : Points de prélèvements des eaux dans le bassin versant amont du Chiémboh

Code	Points d'échantillonnage	Ouvrages hydrauliques	Longitudes	Latitudes
F1	Mayoum	Forage	10,897376	5,702155
F2	Kounga (Hôpital)	Forage	10,894809	5,711124
S1	Mambèn chefferie	Source	10,894163	5,71876
S2	Mambèn (ENIEG)	Source	10,894703	5,706062
P1	Kounga	Puits	10,91585	5,713051
P2	Njissé	Puits	10,8869	5,699582
E	Mabouta	Cours d'eau Chiémboh	10,90685	5,69705

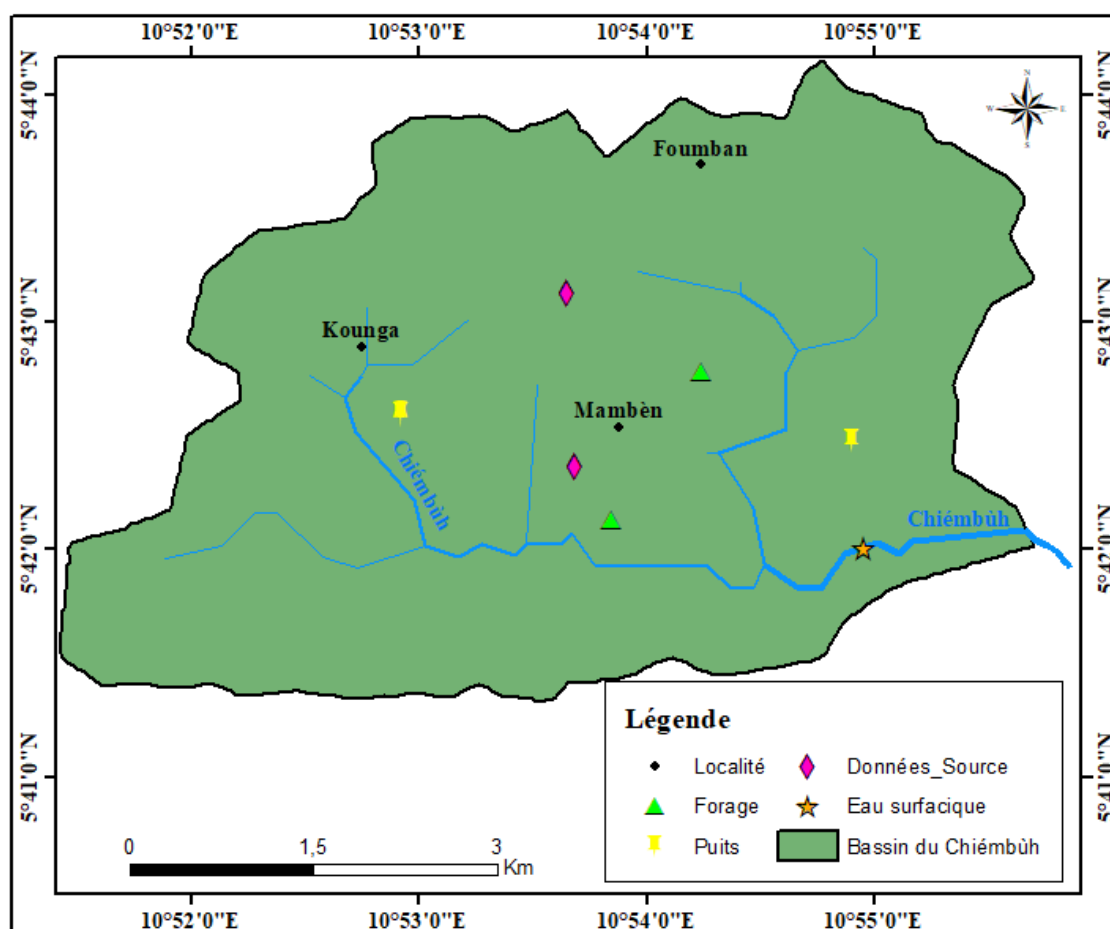


Figure 7 : Carte de localisation des points d'échantillonnage dans le bassin versant amont du Chiémboh.

II.2.4. Prélèvement et conditionnement des échantillons d'eau

Sept échantillons d'eau ont été collectés durant la période comprise entre février (saison sèche) et août (saison pluvieuse) 2022. A chaque point d'échantillonnage, les échantillons d'eau ont été conditionnés dans des bouteilles plastiques de 0,5 L (Figure 8) préalablement rincées à l'eau distillée puis trois fois avec l'eau à prélever ensuite remplies à ras bord, fermées

hermétiquement pour éviter les échanges de gaz (Rodier, 2009 ; Ndam Ngoupayou et al., 2016). Tous ces échantillons ont été étiquetés et conservés dans une glacière. Les analyses chimiques des échantillons d'eau (forage, puits, source et cours d'eau) ont été effectués au Laboratoire d'Analyse Géochimiques des Eaux (LAGE/IRGM) de Nkolbisson à Yaoundé. Les analyses bactériologiques des échantillons d'eau (puits et source) quant à elles ont été réalisées au laboratoire de Wastewater Research Unit (WRU) du Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé I.

II.3. Travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoire ont consisté en la caractérisation du bassin versant amont du Chiémbeh, suivis de la détermination des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des échantillons d'eau et enfin la synthèse et traitement des différentes données obtenues.

II.3.1. Caractérisation physiographique du BVAC

Elle a consisté à déterminer entre autres les caractéristiques géométriques ou morphométriques (surface, périmètre, forme, relief, pente et hypsométrie) et hydrographiques (densité de drainage et hydrographique, rapport de confluence et de longueur) du BVAC. Pour ce faire, une carte topographique numérisée au 1/500000 et des modèles numériques d'élévation (MNE) du plateau Bamoun, dérivé d'images satellites de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) avec une résolution de 30 mètres ont été utilisées pour effectuer cette tâche. Les logiciels SIG (Global Mapper 22 et ArcGIS 10.8.2) ont été utilisés pour la délimitation et la caractérisation physiographique du bassin versant amont du Chiémbeh.

II.3.1.1. Caractéristiques géométriques ou morphologiques

Il s'agit ici de donner les paramètres de disposition dans le plan à savoir l'aire, le périmètre, la forme et les dimensions du rectangle équivalent du BVAC.

a) Aire et périmètre

L'aire et le périmètre du bassin versant amont du Chiémbeh sont obtenus par la méthode de digitalisation à l'aide du logiciel ArcGIS 10.8.2.

b) Forme

La forme du BVAC est déterminée à l'aide de l'indice de compacité de Gravelius (1914) noté K_G et donné par la relation suivante :

$$K_G = \frac{P}{2\sqrt{3.14.A}} \approx 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Avec, K_G : Indice de compacité de Gravelius ;

P : Périmètre du bassin [km] ;

A : Superficie du bassin [km²].

c) Dimension du rectangle équivalent

La longueur (L_{eq}) et la largeur (l_{eq}) du rectangle équivalent ont été calculées par les formules empiriques suivantes :

$$L_{eq} = \frac{K_G \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - (1.12 K_G)^2} \right]$$

$$l_{eq} = A / L_{eq}$$

d) Relief

Le relief du bassin versant amont du Chiémboh est caractérisé par sa courbe hypsométrique. Cette dernière a été réalisée à l'aide du logiciel Excel. Elle permet de déterminer les paramètres tels que : l'altitude maximale (H_{max}), l'altitude minimale (H_{min}), la pente moyenne (I_m) et l'altitude moyenne (H_{moy}) donnée par l'expression : $H_{moy} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i H_i}{A}$ avec : A_i (en km²) aires spécifiques des différentes tranches d'altitude et H_i (en m) étant l'altitude moyenne entre deux courbes de niveau ; A = aire totale du bassin versant, en km² ; H_{moy} = altitude moyenne du bassin versant, (en m). L'altitude médiane ($H_{méd}$), est lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin versant, sur la courbe hypsométrique.

La pente moyenne du bassin versant (I_m) est le paramètre qui permet de déterminer la vitesse à laquelle l'eau circule dans le bassin. Elle est donnée par la relation suivante :

$I_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{\sqrt{A}}$ (en m/km), où H_{max} ($H_{5\%}$) est l'altitude maximale, H_{min} ($H_{95\%}$) l'altitude minimale et A l'aire totale du bassin versant.

e) Indice de pente de roche (IPR)

Il est déduit du rectangle équivalent et son expression est la suivante :

$$IPR = \frac{1}{\sqrt{L_{eq}}} \sum \sqrt{a_i d_i}$$

avec L_{eq} : longueur du rectangle équivalent (en m) ; a_i : fraction de l'aire A (en %) ; d_i : dénivelé spécifique (en m).

f) Indice de pente globale (IPG)

L'indice de pente global est le rapport dénivelé D et de la longueur du rectangle équivalent L_{eq} . Cet indice est donné par la relation suivante :

$$IPG = \frac{H_5 - H_{95}}{L_{\text{eq}}}$$

$H_5\%$: altitude maximale (m) ; $H_{95}\%$: altitude minimale ; $(H_5\% - H_{95}\%)$: dénivelé D ; L_{eq} : longueur du rectangle équivalent (m).

g) Dénivelée spécifique (Ds)

Elle est donnée par la relation suivante : $Ds = Ig\sqrt{A}$.

II.3.1.2. Caractéristiques hydrographiques

La caractérisation du réseau hydrographique du BVAC passe par l'évaluation des paramètres tels que : la hiérarchisation du réseau hydrographique, la densité de drainage, la densité de réseau et la loi de composition du réseau hydrographique.

La hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant amont du Chiémboh s'est faite selon la méthode de classification de Musy (2004) dont le principe est le suivant :

- tout cours d'eau n'ayant pas d'affluents sera dit d'ordre 1 ;
- au confluent de deux cours d'eau de même ordre n, le cours d'eau résultant sera d'ordre $n+1$;
- un cours d'eau recevant un affluent d'ordre inférieur gardera son ordre.

La densité de drainage est donnée par le rapport de la somme des longueurs des cours d'eaux permanents ou temporaires sur la surface totale du bassin versant. $Dd = \sum Li/A$ (en km/km^2), avec Li : la longueur du cours d'eau (km) et A : surface du bassin versant.

La densité du réseau hydrographique est donnée par le rapport du nombre du nombre de cours d'eau temporaires ou permanents sur la surface totale du bassin. Elle est donnée par : $Dr = N/A$ (en km^{-2}), avec N : nombre de cours d'eau et A : la surface du bassin versant (km^2).

La loi de composition du réseau hydrographique concerne le rapport de confluence (R_c) et le rapport de longueur (R_l), données respectivement par les relations ci-après :

$R_c = \frac{n_w}{n_{w+1}}$; $R_l = \frac{l_{w+1}}{l_w}$. Ou n_w et l_w sont respectivement le nombre et la longueur des cours d'eau d'ordre w.

II.3.2. Mesure des paramètres physiques au laboratoire

Les paramètres physiques pris en compte ici sont : le pH, conductivité électrique et la température. Ces paramètres sensibles aux conditions du milieu, ont été mesurés une fois de

plus au laboratoire à l'aide d'un multiparamètre de marque ORTON muni de trois électrodes. L'électrode de pH est conservée dans une solution tampon de pH compris entre 4,00 et 7,00 ; l'électrode TDS/CONDUCTIMETER qui permet de mesurer la TDS et la conductivité électrique, et l'électrode de mesure des températures. Chacune des électrodes est plongée dans un bécher contenant au moins 100ml de l'échantillon. Les résultats sont directement lus sur l'écran de l'appareil.

II.3.3. Traitement et conditionnement des échantillons

Une fois arrivés au laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux de l'IRGM à Yaoundé, les échantillons ont été filtrés au moyen d'une pompe électrique à vide par la méthode de filtration frontale. Cette unité de filtration est munie de filtres celluloses millipores (filtre NALGENE) de porosité 0,45 μm préalablement séchés à l'étuve à 105°C pendant trois heures. Chaque filtrat a été reparti dans trois flacons :

- le premier a servi à la mesure de l'alcalinité ;
- le second est destiné à l'analyse des anions majeurs ;
- le troisième pour l'analyse des cations majeurs et des éléments en traces. Ce dernier a été acidifié avec l'acide nitrique (HNO_3) pour éviter la consommation des ions par les micro-organismes et la précipitation de certains ions comme le fer. Ces trois sont ensuite conservés dans un réfrigérateur à une température de 4°C.

II.3.4. Analyses chimiques et bactériologiques des eaux

II.3.4.1. Analyses chimiques

Les éléments chimiques qui ont été pris en compte dans le cadre de cette étude sont : les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+), Les anions majeurs (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-}) et les éléments en traces (F^- , NH_4^+ et PO_4^{3-}).

Le laboratoire d'Analyse Géochimique des Eaux (LAGE) de Nkolbisson a permis d'effectuer ces analyses par les méthodes suivantes : spectrométrie ICP-AES (Inductivity Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer) pour les cations et par chromatographie ionique HPLC (High Performate liquid chromatography) sur Dionex ICS-100 pour les anions. Les principes et protocoles d'analyses sont présentés à l'annexe 4.

II.3.4.2. Balance ionique (BI)

Le calcul de la balance ionique a été effectué pour vérifier la fiabilité des résultats des analyses et vérifier l'équilibre ionique des eaux. En effet, dans une eau tamponnée (où les

analyses ont été bien faites), la somme des concentrations des cations est égale à la somme des concentrations des anions ($TZ^+ = TZ^-$). Elle est donnée par la formule suivante :

$$BI = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100 \text{ ml}$$

L'erreur varie de 5 % pour les eaux dont la somme des cations ou des anions est supérieur à 30 méq/l et de 10 % pour celles dont elle est inférieure à 1 méq/l (Ndam Ngoupayou, 1997, Boeglin et al., 2003, Abdoukadi et al., 2015).

II.3.4.3. Analyse des paramètres bactériologiques

L'analyse bactériologique de l'eau réalisée au laboratoire de Wastewater Research Unit (WRU) de l'Université de Yaoundé, a pour but de mettre en évidence la présence des bactéries qui modifient l'aptitude d'une eau à une utilisation donnée. La méthode utilisée est « la colorimétrie sur membrane filtrante ». Elle permet d'identifier les bio-indicateurs de contamination fécale que Rodier (1978) définit comme des bactéries d'habitat fécal normal et exclusif. Il s'agit notamment des streptocoques fécaux (SF), des *Escherichia coli* et des coliformes fécaux (CF). Les principes et protocoles d'analyses de ces bactéries sont présentés à l'annexe 5.

II.3.5. Traitement des données physico-chimiques et bactériologiques

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les facies des eaux et l'origine des principaux éléments chimiques. Tandis que l'analyse bactériologique de l'eau permet de mettre en évidence les bactéries qui modifient l'aptitude d'une eau à une utilisation donnée. Ces paramètres constituent des indicateurs de la qualité de l'eau. Les données bactériologiques et physicochimiques sont traitées avec le logiciel Microsoft Excel 2016. Les différents résultats ont été traités par les méthodes hydrochimiques classiques et statistiques.

Résumé

Le bassin versant amont du Chiémbeh est le site retenu pour la présente étude. Il est situé dans la région de l'Ouest-Cameroun, plus précisément dans le département du Noun entre les latitudes 5°41' et 5°44' Nord et les longitude 10°52' et 10°55' Est. Six ouvrages hydrauliques (deux forages, deux puits et deux sources) et un cours d'eau (le Chiémbeh à Mabouta) ont été échantillonnés en saison sèche (février 2022) et en saison de pluies (août 2022) après que les paramètres physico-chimiques (pH, T°C, CE) soient effectués in-situ sur le site. Les analyses des paramètres chimiques des eaux (cations et anions majeurs) ont été effectuées au LAGE à Nkolbisson par la méthode ICP-AES (Inductivity Coupled Plasma-Atomic Emission

Spectrometer) et par chromatographie ionique HPLC sur Dionex ICS-100. Par contre, Les paramètres bactériologiques (coliforme et streptocoques fécaux) ont été déterminés par filtration sur membrane au laboratoire WWRU de l'Université de Yaoundé I. Les résultats analytiques ainsi obtenus ont été par la suite traités à l'aide des méthodes hydrochimiques et analyse statistique multivariée pour fournir des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III : RESULTATS

Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus sur les caractéristiques physiographiques, ainsi que les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh.

III.1. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BVAC

III.1.1. Caractéristiques morphométriques

Le bassin versant amont du Chiémbùh (BVAC) a une superficie de 28,55 km² et un périmètre de 24,75 km. L'indice de compacité est égal à 1,30 ; ce qui lui confère une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent de longueur 9,35 km et de largeur 3 km. Le BVAC appartient au plateau Bamoum d'altitudes comprises entre 1080 m et 1220 m (Tableau 3). Il présente un relief caractérisé par l'alternance des collines et des vallées évoluant de l'ouest vers l'est et occupé par le cours d'eau principal Chiémbùh. Ainsi, l'agencement du relief révèle une subdivision du site en cinq unités géomorphologiques que sont (Figure 9) :

- l'unité 1 avec des altitudes comprises entre 1170 m et 1240 m occupant 22,3 % de la surface totale du bassin ;
- l'unité 2 avec des altitudes comprises entre 1120 m et 1170 m occupant 55,2 % ;
- l'unité 3 avec des altitudes comprises entre 1070 m et 1120 m occupant 19,7 % ;
- l'unité 4 avec des altitudes comprises entre 1020 m et 1070 m occupant 1,7 % ;
- l'unité 5 avec des altitudes comprises entre 950 m et 1020 m occupant 1,1 %.

La différence entre les tranches d'altitude et les surfaces spécifiques (Tableau 4) du BVAC a permis de mettre en évidence sa courbe hypsométrique (Figure 10). Cette dernière a été utilisée pour déterminer les altitudes à H_{5%} ; H_{95%} ; H_{50%} (médiane) qui sont respectivement de 1220 m ; 1080 m et 1520 m. L'altitude moyenne est de 1145,13 m et la pente moyenne de 26,20 m/km. Les indices de pente de roche (IPR) et globale (IPG) sont de 0,27 m/km et 0,015 m/km respectivement (Tableau 3). Le dénivelé spécifique égal à 0,08 m montre que le BVAC a un relief faible.

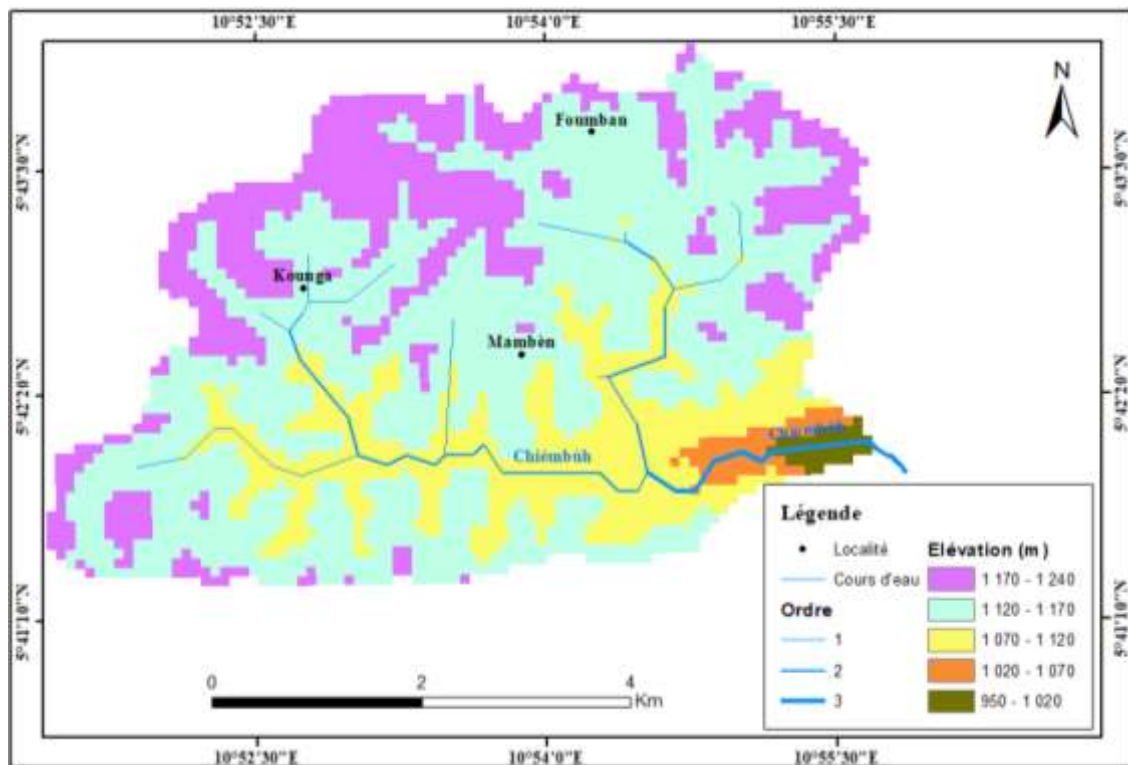


Figure 8 : Unités géomorphologiques du bassin versant amont du Chiémboh.

Tableau 3 : Paramètres physiographiques du bassin versant amont du Chiémboh.

Paramètres	Symbole	Unités	Valeurs
Aire du bassin	A	km ²	28,55
Périmètre	P	km	24,75
Indice de Gravelius	Kg	/	1,30
Longueur équivalente	Léq	km	9,35
Largeur équivalente	léq	km	3,05
Altitude minimale	Hmin	m	1080
Altitude maximale	Hmax	m	1220
Altitude moyenne	Hmoy	m	1145,13
Altitude médiane	Hmed	m	1145
Pente moyenne du BV	Im	m/km	26,20
Indice de pente de roche	IPR	/	0,27
Indice global	IPG	/	0,015
Dénivelé spécifique	Ds	km	0,08
Longueur du cours d'eau	L	km	18,09

Tableau 4 : Eléments caractéristiques de l'hypsométrie du bassin versant amont du Chiémbùh

Classe d'altitude (m)	Dénivelée d_i (m)	Superficie partielle A_i (km ²)	% de superficie a_i (%)	$a_i d_i$	$A_i d_i / A$	$\sqrt{a_i d_i}$
1170-1240	70	6,38	22,3	1560	54,68	7,39
1120-1170	50	15,75	55,2	2760	96,67	9,83
1070-1120	50	5,62	19,7	985	34,50	5,87
1020-1070	50	0,50	1,7	85	2,98	1,73
950-1020	70	0,30	1,1	77	2,70	1,64
Total		28,55	100	5467	191,53	26,46

Légende : d_i : Dénivelée ; A_i : Superficie partielle ; A : Superficie totale

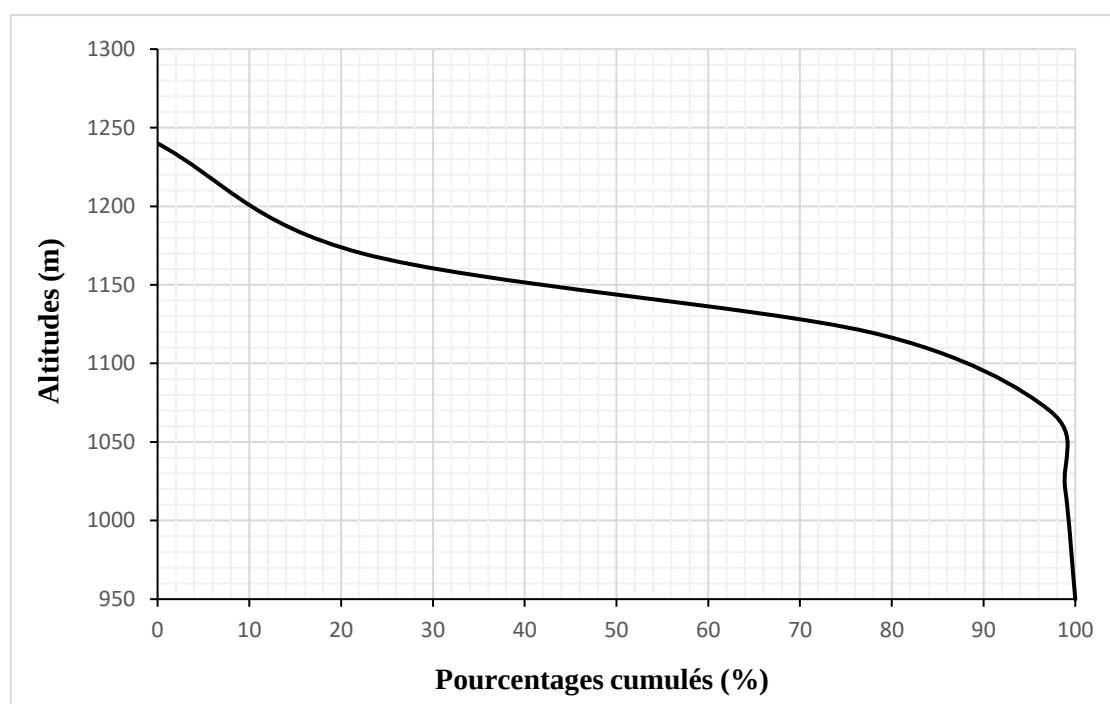


Figure 9 : Courbe hypsométrique du bassin versant amont du Chiémbùh.

III.1.2. Caractéristiques hydrographiques

Le Chiémbùh principal affluent du Mfû dans l'arrondissement de Fouban, est un cours d'eau d'ordre 3. Il prend sa source à kounga, l'un des quartiers de la ville de Fouban et irrigue les autres quartiers tels que Njissé, Njmbam, Mambèn, Machinbain, Njikwet. Sur une longueur d'environ 18 km, il s'écoule du nord-ouest vers le sud-est drainant ainsi un bassin au réseau hydrographique de type dendritique. Les densités de drainage (D_d) et hydrographique (D_h), ainsi que les rapports de confluence (R_c) et de longueur (R_l) du BVAC sont

respectivement de 0,63 km/km² ; 0,63 km⁻² ; 1,43 et 0,98 (Tableau 5). D'après Musy, 2004 les valeurs de densité de drainage inférieures à 4 km/km² correspondent aux régions à écoulement peu développé. Il convient de dire qu'il s'agit d'un réseau centralisé vers un seul collecteur.

Tableau 5 : Caractéristique du réseau hydrographique du bassin versant amont du Chiémbùh.

Ordres des talwegs	Longueurs des talwegs (en m)	Longueur moyenne (en m)	Rc	D _d (km/km ²)	D _r (km ⁻²)	R _L
1	7931,22	793,12	1,43	0,63	0,63	0,98
2	7760,79	1108,68				
3	2398,76	2398,76				
Total	18090,77	4300,56				

Légende : Rc : Rapport de confluence ; D_d : Densité de drainage ; D_r : Densité du réseau ; R_L : Rapport de longueur.

III.2. NIVEAUX DE VARIATIONS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES EAUX DU BVAC

III.2.1 Paramètres physiques (pH, CE, MES)

Les valeurs du pH enregistrées dans les eaux de surface et souterraines du BVAC varient entre 4,38 et 6,35, pour une moyenne arithmétique de 5,75 (Tableau 6).

Les valeurs de CE oscillent entre 7,6 à 180,2 µS/cm, avec une moyenne de 56,58 µS/cm (Tableau 6).

Les teneurs des matières en suspensions (MES) obtenues sont comprises entre 0,6 et 45,12 mg/l, pour une moyenne arithmétique de 12,92 mg/l (Tableau 6).

Tableau 6 : Niveau de variations des paramètres physiques des eaux du BVAC

PARAMETRES	pH	CE (µS/cm)	MES (mg/l)
Min	4,38	7,6	0,6
Max	6,35	180,2	45,12
Moy.A	5,75	56,58	12,92
N	14	14	14

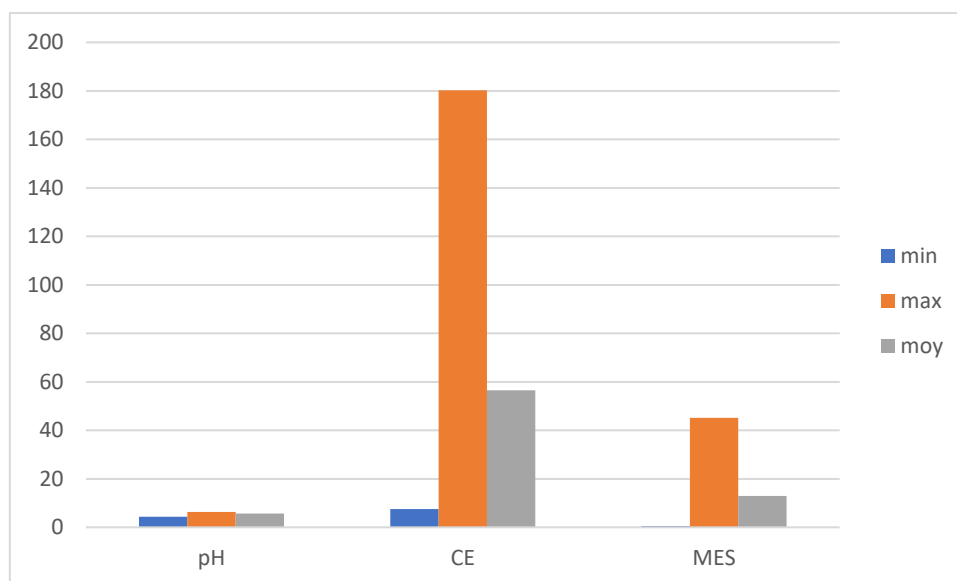


Figure 10 : Niveaux de variation des paramètres physiques.

III.2.2 Paramètres chimiques

III.2.2.1. Cations majeurs et somme des équivalents cations (TZ+)

Les concentrations des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) varient respectivement entre 59,5 et 971 $\mu\text{eq/l}$; 41,67 et 845,00 $\mu\text{eq/l}$, pour des moyennes arithmétiques respectives de 254,29 $\mu\text{eq/l}$ et 250,12 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 7 et Figure 11).

Les alcalins (Na^+ et K^+) ont des concentrations qui fluctuent respectivement entre 20,87 et 225,22 $\mu\text{eq/l}$; 2,56 et 148,72 $\mu\text{eq/l}$ pour des moyennes arithmétiques respectives de 104,88 et 53,35 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 7 et Figure 11).

La somme des équivalents cations oscille entre 124,60 et 1346,65 $\mu\text{eq/l}$, pour une moyenne arithmétique de 662,63 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 7 et Figure 11).

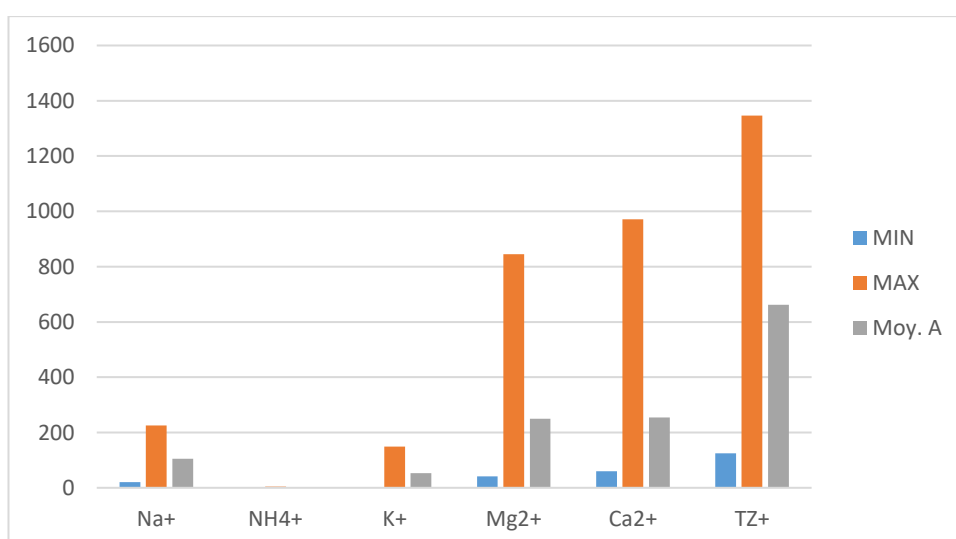


Figure 11 : Niveau de variation des cations majeurs et TZ^+ .

III.2.2.2. Anions majeurs et somme des équivalents anions (TZ⁻)

Les concentrations en nitrate varient de 0 à 12,13 µeq/l, pour une moyenne arithmétique de 2,47 µeq/l (Tableau 7 et Figure 12).

Les teneurs en bicarbonates se situent entre 101,64 et 1436,07 µeq/l, avec une moyenne arithmétique de 475,06 µeq/l (Tableau 7 et Figure 12).

Les teneurs en chlorure oscillent entre 1,13 et 32,11 µeq/l, pour une moyenne arithmétique de 9,10 µeq/l (Tableau 7 et Figure 12).

Les concentrations en sulfates sont inférieures ou égales à 38,54 µeq/l, pour une moyenne arithmétique de 5,40 µeq/l (Tableau 7 et Figure 12).

La somme des équivalents anions (TZ⁻) fluctue entre 105,66 µeq/l et 1506,72 µeq/l, pour une moyenne arithmétique de 475,06 µeq/l (Tableau 7 et Figure 12).

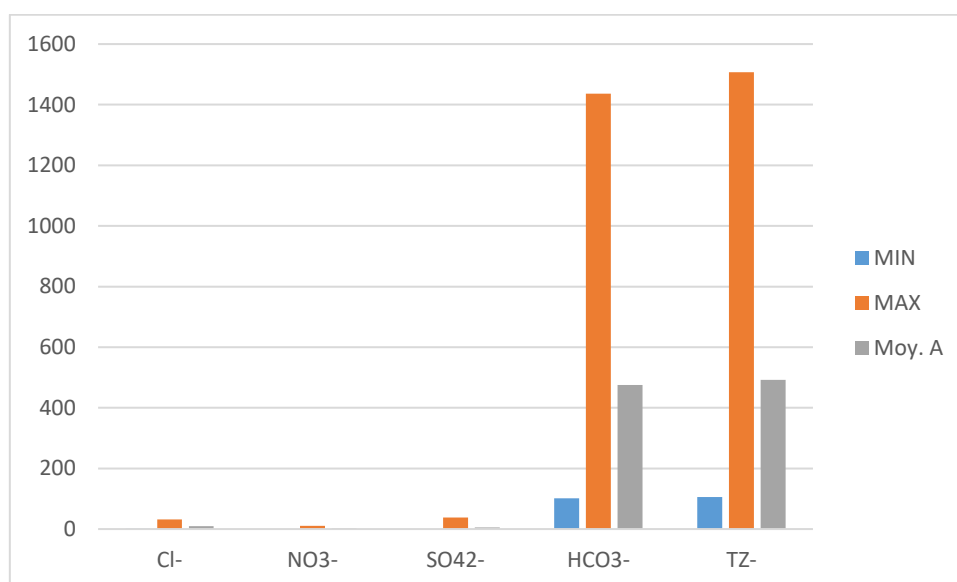


Figure 12 : Niveaux de variation des anions majeurs et TZ⁻.

III.2.2.3. Éléments en traces

Les teneurs des ions phosphates et ammoniums sont respectivement inférieures ou égales à 10,85 µeq/l et 3,89 µeq/l, pour des moyennes arithmétiques respectives de 1,16 µeq/l et 0,28 µeq/l (Tableau 7 et Figure 13).

Les concentrations des ions fluorures sont comprises entre 0 et 3,68 µeq/l, pour une moyenne arithmétique de 2,36 µeq/l (Tableau 7 et Figure 13). Les teneurs de ces éléments en traces sont très peu présents dans le bassin versant amont du Chiémbeh.

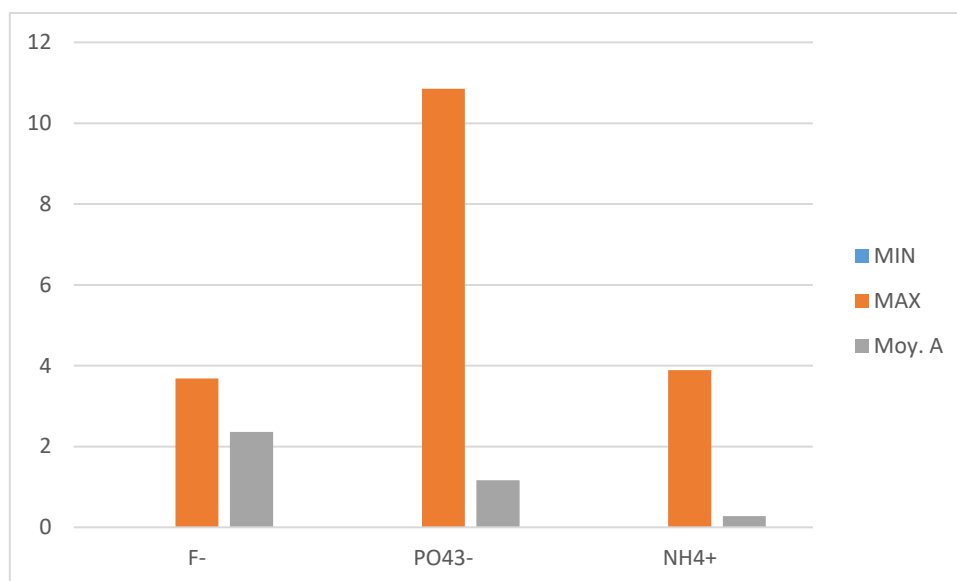


Figure 13 : Niveaux de variation des éléments en traces.

III.2.2.4. Balance ionique (Bi)

La balance ionique des eaux du bassin versant amont du Chiémboh se situe entre - 23,99% et 85,98%, pour une moyenne arithmétique de 37,39% (Tableau 7). Les eaux de surface et souterraines du BVAC présentent dans l'ensemble un fort déficit anionique dans leur composition chimique. Cela pourrait être dû à une variété des facteurs tel que la suppression d'anions par des processus d'évaporation et la faible minéralisation des eaux de ce bassin.

III.3. NIVEAUX DE VARIATIONS DES PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC

Les coliformes fécaux (CF) varient entre 0,0 et 150 UFC/100 ml, pour une moyenne arithmétique de 62,13 UFC/100 ml (Tableau 8).

Les Streptocoques fécaux (SF) oscillent entre 0,0 et 160 UFC/100 ml pour une moyenne de 62,5 UFC/100 ml (Tableau 8).

Les Escherichia colis (E. colis) varient entre 0,0 UFC/100 ml et 160 UFC/100 ml, pour une moyenne arithmétique de 65,75 UFC/100 ml (Tableau 8).

Tableau 7 : Niveaux de variation des paramètres chimiques des eaux du bassin versant amont du Chiémboh.

Paramètres Unités	Na ⁺ (μeq/l)	NH ₄ ⁺ (μeq/l)	K ⁺ (μeq/l)	Mg ²⁺ (μeq/l)	Ca ²⁺ (μeq/l)	TZ ⁺ (μeq/l)	F ⁻ (μeq/l)	Cl ⁻ (μeq/l)	NO ₃ ⁻ (μeq/l)	PO ₄ ³⁻ (μeq/l)	SO ₄ ²⁻ (μeq/l)	HCO ₃ ⁻ (μeq/l)	TZ ⁻ (μeq/l)	BI (%)
Min	20,87	0,00	2,56	41,67	59,5	124,60	0,00	1,13	0,00	0,00	0,00	101,64	105,66	-11,09
Max	225,22	3,89	148,72	845,00	971	1346,65	3,68	32,11	10,32	10,85	38,54	1436,07	1506,72	77,17
Moy	104,88	0,28	53,35	250,12	254,29	662,63	2,36	9,10	2,47	1,16	5,40	475,06	492,04	11,41
Méd	83,48	0,00	34,23	133,33	184,00	653,69	2,45	5,21	0,89	0,00	1,35	381,15	385,32	-0,04
VAR	5622,18	1,00	2088,43	66136,79	48201,60	174791,53	1,05	78,86	10,35	9,16	96,56	127846,73	133866,87	866,88
ET	77,81	1,04	47,42	266,88	227,84	433,86	1,06	9,22	3,34	3,14	10,20	371,05	379,69	30,55
n	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14

Tableau 8 : Niveaux de variation des paramètres bactériologiques des eaux du BVAC.

PARAMETRES	CF (UFC/100ml)	SF (UFC/100ml)	E. Coli (UFC/100l)
Min	0	0	0
Max	150	160	160
Moy.A	62,13	62,5	65,75

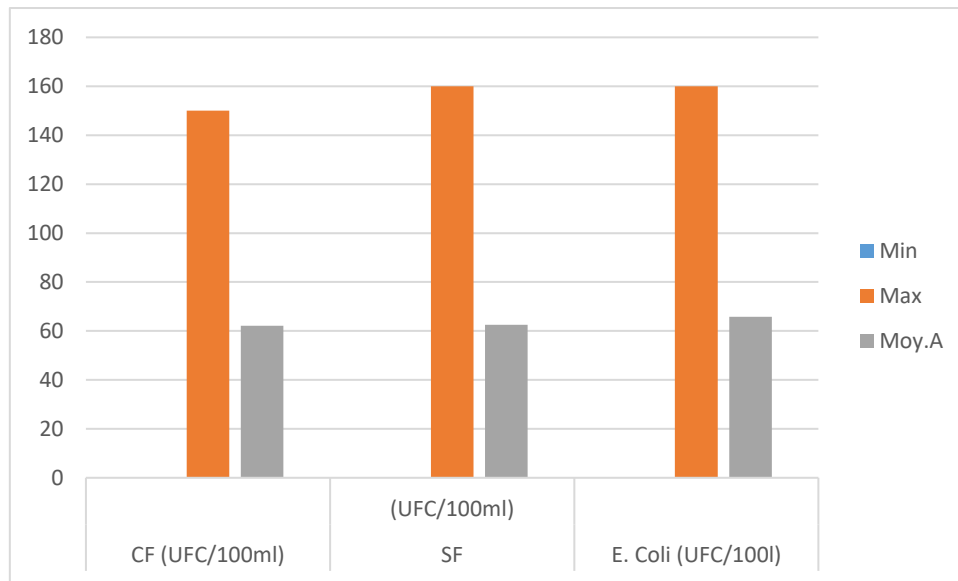


Figure 14 : Niveaux de variation des paramètres bactériologiques.

Résumé

Le bassin versant amont du Chiémbùh, objet de la présente étude a une superficie de 28,55 km², un périmètre de 24,75km et un indice de compacité de 1,30 lui conférant une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent de longueur 9,35 km et de largeur 3 km. Son relief est caractérisé par l'alternance des collines et des vallées évoluant de l'ouest vers l'est avec des altitudes comprises entre 1080 et 1220 m. Le chiémbùh est le principal affluent du Mfu dans l'arrondissement de Foumban. Il prend sa source à Kounga et s'écoule du nord-ouest vers le sud-est dans un réseau hydrographique de type dendritique. Les eaux du BVAC sont acides (pH compris entre 4,38 et 6,35) et faiblement minéralisées ($7,6 \leq CE \leq 180 \mu\text{S/cm}$, $105,66 \leq TZ^- \leq 1506,72 \mu\text{eq/l}$ et $124,60 \leq TZ^+ \leq 1346,65 \mu\text{eq/l}$). Les analyses bactériologiques des eaux souterraines montrent une forte présence des microéléments bactériologiques (CF et SF).

**CHAPITRE IV : ESSAI
D'INTERPRETATIONS ET DE
DISCUSSION**

Introduction

Dans ce chapitre, il est question de discuter et faire des essais d'interprétations des résultats obtenus sur les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux du bassin versant amont du Chiémbeh ainsi que leurs différentes origines. Ceci à partir des variations spatio-temporelles et l'application des méthodes d'analyse statistiques multivariées.

IV.1. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC

IV.1.1. Paramètres physiques

IV.1.1.1. Potentiel d'hydrogène

L'ensemble des eaux du BVAC sont acides ($4,38 \leq \text{pH} \leq 6,35$). Les eaux souterraines (S1, S2, F1 et P1) sont légèrement plus acides que les eaux de surface (Tableau 9 et 10). Les valeurs de pH les plus basses sont enregistrées pendant la saison pluvieuse (Figure 15 et annexe 7), ce qui peut être attribué à l'effet des précipitations acides. L'acidité de ces eaux pourrait être étroitement liée à la nature du substratum lithologique plutono-metamorphique (orthogneiss indifférenciés, granitoïdes, orthogneiss granitiques, et gneiss migmatitiques) et une couverture pédologique ferrallitique du site d'étude, la décomposition de la matière organique et aux activités anthropiques dû aux rejets des produits chargés en ions hydroxyde (eau savonneuse, détergeant) dans ces eaux. Les valeurs de pH obtenues ici sont proches de celles trouvées par Kemayou et al., 2013 sur le Ngam (4,21), Mfonka et al., 2015 sur le bassin versant du Nchi (6,90), Nsangou (2017) sur le Mfu (5,9) et Mfopa (2020) dans le Mazam (6,69) où les eaux drainent un socle très ancien du Paléoproterozoïque (2,1 Ga) et du Panafricain (618 ma) et très altéré (basalte de plateau, rhyolite, granite et surtout le gneiss), sont en majorité acides ($\text{pH} < 7$). Cependant elles sont inférieures à celles trouvées par Tati (2008) sur le bassin versant du Nkoup (7,20), Mbouobda (2014) sur la Panké (7,52), Njinwoua (2015) sur le Noun (7,17), Njikeu (2015) sur le Ndé amont (7,19) et Ngnatcha (2019) sur le Ngouot-Ngouot (7,27) donc le socle est à dominance volcanique (basaltes, pyroclastes etc.).

IV.1.1.2. Conductivité électrique (CE)

Les eaux du BVAC dans l'ensemble, présentent des minéralisations faibles à très faibles ($7,6 \leq \text{CE} \leq 180,2 \mu\text{S/cm}$) d'après la classification établie par Detay (1993). Quel que soit la saison, les eaux souterraines (P1, S2 et F1) présentent des minéralisations plus élevées

que les eaux de surface (E). Par ailleurs, les conductivités électriques enregistrées en saison de pluie dans les forages (F1, F2 et P1) et le puits (P1) sont légèrement supérieures à celles enregistrées en saison sèche (Figure 15 et annexe 7). C'est le contraire pour le puits (P2) et les sources (S1 et S2). Les faibles minéralisations et les variations ainsi observés seraient en rapport avec le temps de séjour des eaux souterraines dans la roche encaissante ; à la nature lithologique constituée des roches silicatées d'âge précambriennes. Les valeurs de CE trouvées ici sont de même ordre de grandeur que celles obtenues par Mfonka et al., 2015 sur le bassin versant du Nchi (15,30 $\mu\text{S/cm}$), Nsangou (2017) sur le Mfu (24,5 $\mu\text{S/cm}$) et Mfopa (2020) sur le Mazam (27 $\mu\text{S/cm}$). En outre, celles obtenues par Tita (2008) sur le bassin versant du Nkoup à Foubot (193 $\mu\text{S/cm}$) et Ngnatcha (2019) sur le Ngouot-Ngouot (309,06 $\mu\text{S/cm}$) Ngouoh a Foubot sont largement supérieures.

IV.1.1.3. Matières en suspensions (MES)

Les concentrations en MES dans les eaux souterraines du BVAC sont comprises entre $0,6 \leq \text{MES} \leq 45,12$. Les puits (P1 et P2) et la source (S1) présentent les concentrations les plus élevées en MES. En saison sèche les eaux souterraines sont plus chargées en MES contrairement aux eaux de surfaces qui présentent de forte concentration de MES en saison de pluie (Figure 15 et annexe 7). Ces variations pourraient s'expliquer par le contact direct avec les eaux de pluies, activités anthropiques et le fort taux de fréquentation des ouvrages d'eaux souterraines en saison sèche par les populations. Par ailleurs, les eaux analysées donnent des valeurs supérieures à la norme de l'OMS qui préconisent une absence totale de MES dans les eaux potables.

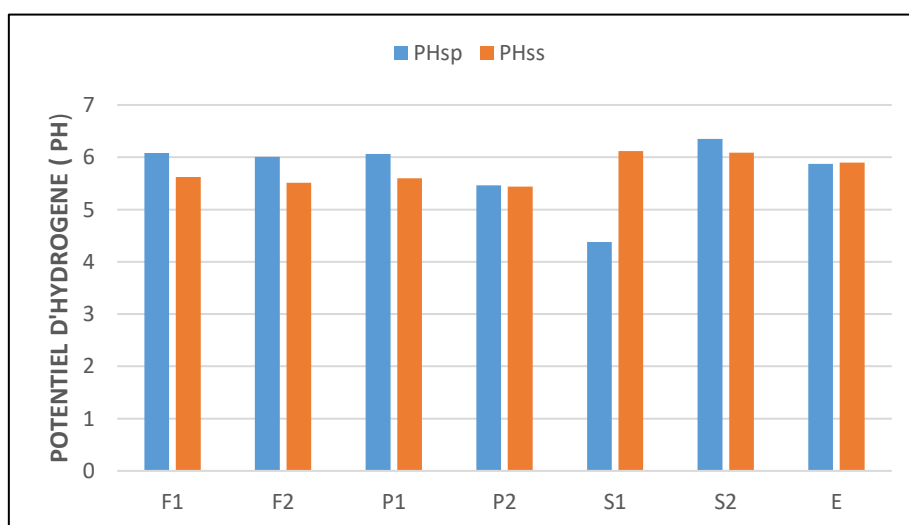


Figure 15 : Variations dans l'espace et le temps du pH par types d'eaux.

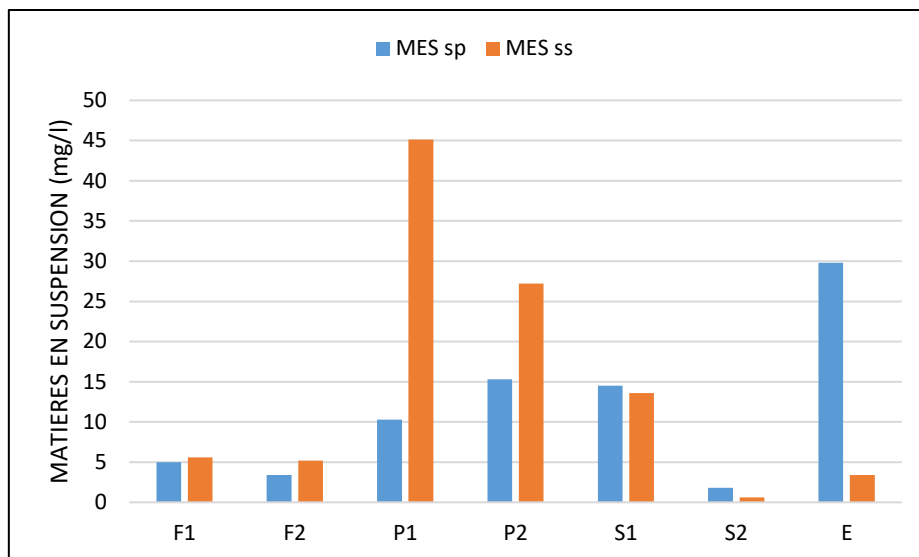


Figure 16 : Variations dans l'espace et le temps des matières en suspensions par types d'eaux.

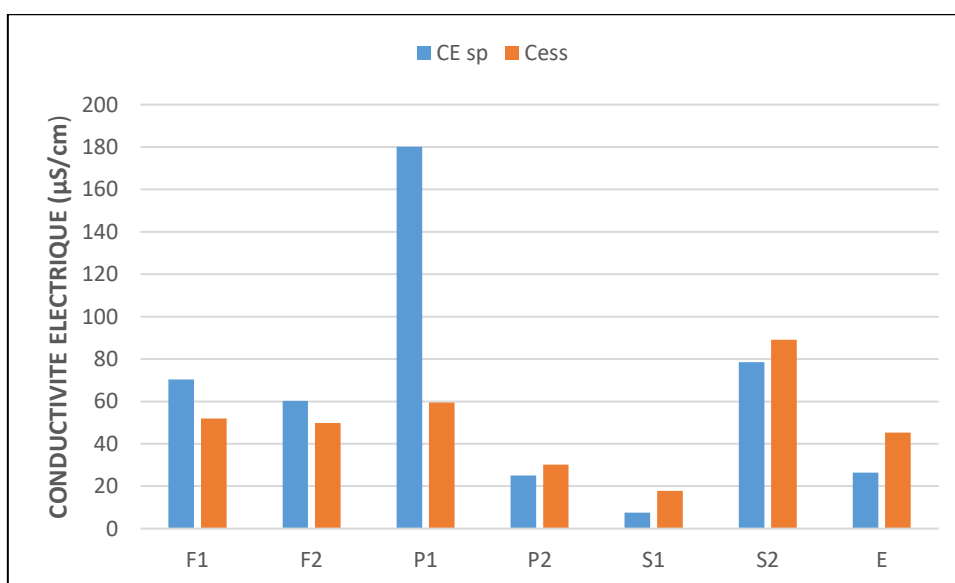


Figure 17 : Variations dans l'espace et le temps de la conductivité électrique par types d'eaux.

IV.1.2. Paramètres chimiques

IV.1.2.1. Cations majeurs et somme des équivalents cations (TZ⁺)

Les concentrations les plus élevées en cations majeurs (Ca^{+} et Mg^{2+}) et TZ⁺ sont observées dans les eaux du puits P1, du forage F1 et de la source S2. Les plus faibles concentrations sont enregistrées dans les eaux de la source S1.

Ces concentrations sont plus faibles en saison de pluie qu'en saison sèche (Figure 18, 19 et annexe 8) dans la plupart des eaux du BVAC. Ces différences pourraient s'expliquer par le temps de séjour des eaux dans la roche mère qui est beaucoup plus significatif dans le cas des eaux souterraines que celles de surface où le renouvellement est permanent. Les concentrations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) se rapprochent de celles obtenues par Mfonka et al., 2018 sur la Nchi. Elles sont par contre inférieures à celles obtenues par Tita (2008) sur le Nkoup à Foumbot et Njinwoua (2015) sur le Noun. Les concentrations en TZ^+ se rapprochent de celles obtenues par Mfonka et al., 2015 sur le Nchi, Njikeu (2015) sur le Ndé et Nsangou (2017) sur le Mfu mais restent inférieures à celles obtenues par Ngnatcha (2019) sur le Ngouot-Ngouot. Toutefois, les valeurs des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) obtenues sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS et l'ANOR ; ce qui nécessite un apport supplémentaire en cations.

IV.1.2.2. Anions majeurs et somme des équivalents anions (TZ^-)

Les concentrations les plus élevées en anions majeurs (HCO_3^- et SO_4^{2-}) et TZ^- sont observées dans les eaux du puits P1 et de la source S2. Contrairement aux eaux du forage F1, du puits P2, de la source S1 et du cours d'eau Chiémbùh qui présentent les plus faibles concentrations sont enregistrées dans les eaux de la source S2 et du cours d'eau Chiémbùh. Dans l'ensemble, les concentrations en HCO_3^- , SO_4^{2-} et TZ^- sont légèrement plus importantes en saison sèche qu'en saison de pluies (Figure 18, 19 et annexe 9). Ces variations seraient liées au temps de séjour très important des eaux souterraines dans la roche sous-jacente. Cependant, les concentrations en HCO_3^- enregistrées sont supérieures aux normes tandis que les teneurs en SO_4^{2-} obtenues sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS et l'ANOR. Les valeurs de HCO_3^- et SO_4^{2-} trouvées sont proches de celles obtenues par Kemayou (2011) sur le Mou, Nsangou (2017) sur le Mfu et Mfonka et al., 2018 sur le Nchi. Ces dernières restent inférieures à celles obtenues par Tita (2008) sur le Nkoup, Mbouobda (2014) et Njinwoua (2015) sur le Noun.

Les teneurs en NO_3^- sont les plus élevées dans les eaux de surface que dans les eaux souterraines. Certaines de ces teneurs sont nulles dans les eaux des puits (P1 et P2) et de la source S2. Le Cl^- présentent des teneurs plus faibles dans le forage F1 et la source S2 et plus élevées dans le puits P1 et le forage F2. A l'exception du puits P1, les concentrations en NO_3^- et Cl^- sont légèrement supérieures dans les eaux de surface par rapport aux eaux souterraines. Ces concentrations sont dans l'ensemble plus élevées en saison de pluies qu'en saison sèche (Figure 18 et annexe 9).

IV.1.2.3. Autres éléments chimiques (NH_4^+ , PO_4^{3-} , F^-)

Les concentrations en ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}) et fluorure (F^-) sont très faibles dans les eaux du bassin versant amont du Chiémboh. Le NH_4^+ présente des concentrations relativement faibles à nulle dans l'ensemble du bassin. Cette concentration est encore plus faible en saison pluvieuse qu'en saison de pluies (Figure 19 et annexe 8). Cette variation des concentrations saisonnière des ions NH_4^+ traduirait une double origine naturelle et anthropique de ces ions. Les concentrations des ions fluorures (F^-) sont faibles dans l'ensemble des eaux étudiées, ceci tant en saison sèche qu'en saison pluvieuse (Figure 19 et annexe 8). Le PO_4^{3-} présente des teneurs nulles dans l'ensemble des eaux souterraines et de surface à l'exception des sources S1 et S2. Par ailleurs, Ces concentrations sont légèrement plus élevées en saison de pluies qu'en saison sèche bien qu'il beaucoup de fluctuations à certains points.

L'ensemble des éléments chimiques analysés dans les eaux du BVAC sont en dessous des valeurs seuils suggérées par l'OMS (2008) pour les eaux de consommation (Annexe 9), quoiqu'on note déjà une pollution dans les eaux souterraines en nitrates.

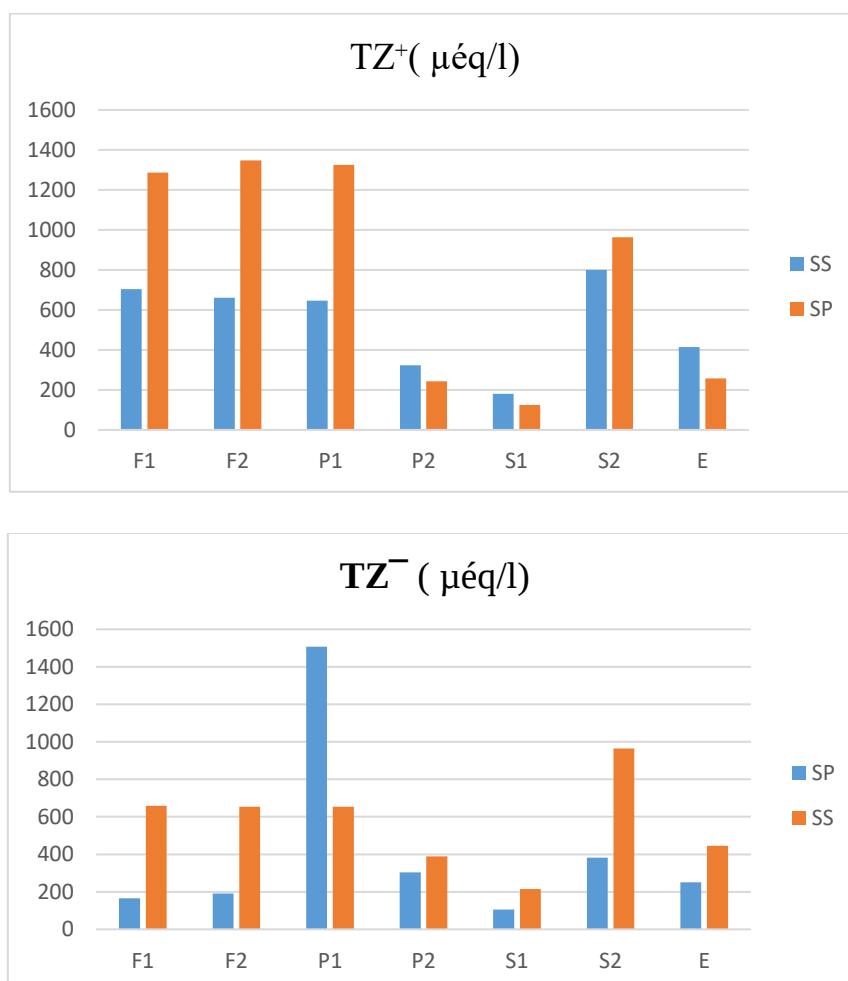
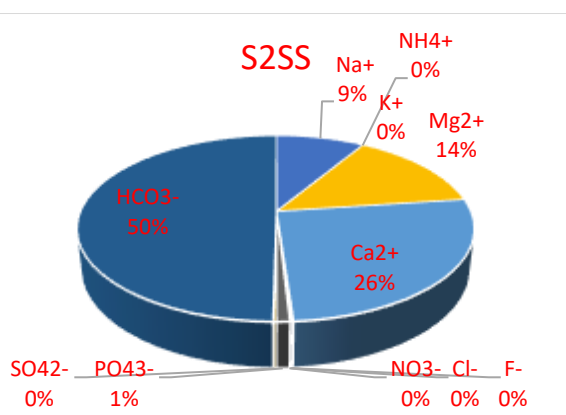
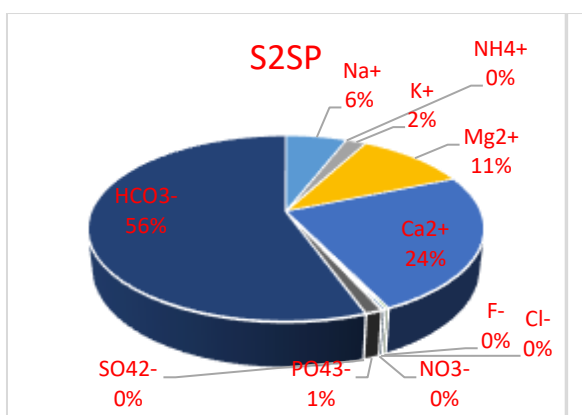
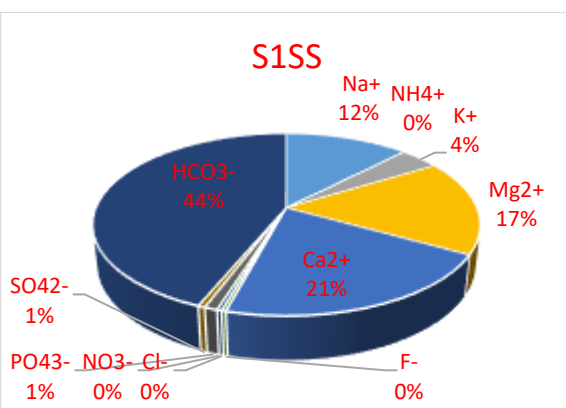
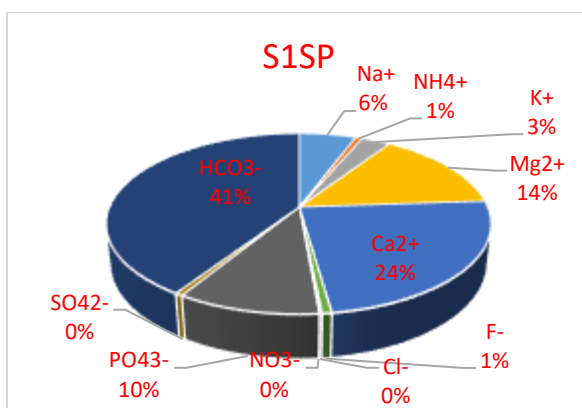
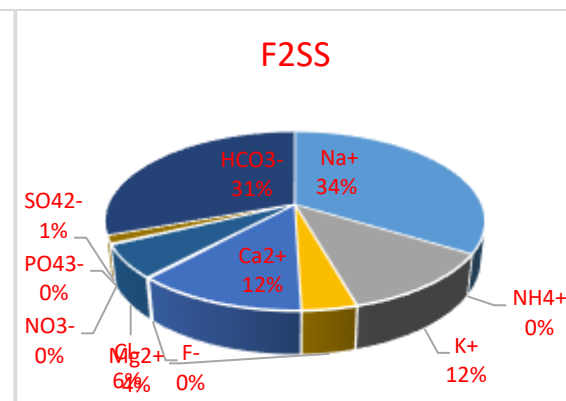
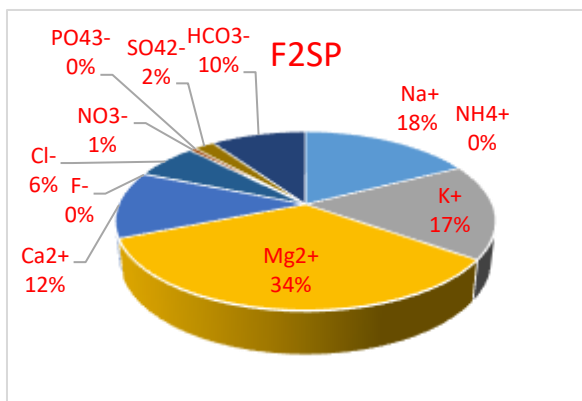
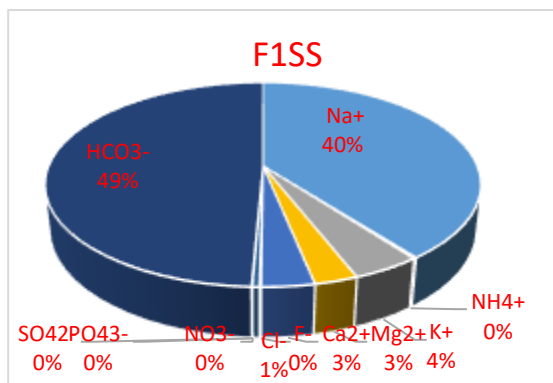
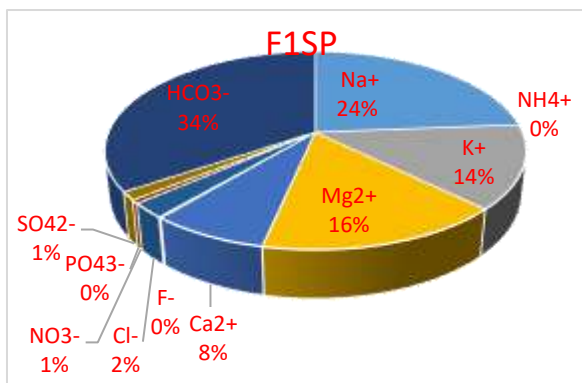


Figure 18 : Variations dans l'espace et dans le temps des teneurs en TZ^+ et TZ^- par types d'eaux.

Tableau 9 : Comparaison des résultats de la qualité physicochimiques des eaux de surface de cette étude à ceux des travaux antérieurs.

		Cours d'eaux	MILIEU GEOLOGIQUE	DATE	pH	CE μS/cm	Ca ²⁺ μéq /l	Mg ²⁺ μéq /l	TZ ⁺ μéq /l	HCO ₃ ⁻ μéq /l	TZ ⁻ μéq /l
LES BASSINS VERSANT DU PLATEAUX BAMOUN	GR : 1	NKOUPI à FOUMBOT ¹	BASALTES DE PLATEAUX + PYROCLASTES + ORTHOGNEISS (600-1,8 ma)	2003/2005	7,20	193,00	289,00	239,00	819,00	1728,00	2130
		MOU AMONT ²		juin-2011	/	/	/	/	724	703	718
		MOU AVAL ²		juin-2011	7,25	58,00	232,00	238,00	724,00	703,00	718,00
		PANKE AVAL ³		Aout-2013	7,52	81,80	298,30	282,30	891,40	890,00	917,40
	GR : 2	MFU à MABOUOH ⁴	BASALTES DE PLATEAUX + RHYOLITES+ ORTHOGNEISS (600-1,8 ma) + GRANITES	Oct-2015	5,9	24,5	101,5	77,36	256,72	254,09	271,70
		MFU à MABOUOH ⁴		Mars-2016	5,92	41,2	170,05	134,15	425,52	444,26	479,69
		MAZAMAMONT E1 ⁵		Aout-2019	6,69	27,1	75	141,6	427,87	295,0	555,97
		MAZAM AVAL E2 ⁵		Aout-2019	7,64	38	100	191,6	426,19	448,03	742,63
		Chièmbùh à FBAN*		Février-2022	5,82	40,7	167,00	131,67	413,97	411,48	445,12
		Chièmbùh à FBAN*		Oct-2022	5,9	24,6	100,50	76,67	257,28	232,79	251,02
		MIEPWEN ⁶ malantouen		Mars-2016	7,15	62	109,00	53,50	330,27	119,67	145,89
		NCHI à FOUMBAN ⁷		2011	6,90	15,30	48,06	32,51	145,00	151,09	176,06
		NOUN AVAL ⁸		2015	7,17	57,46	214,1	212,5	564,42	454,98	495,01
		MAPE à MAGBA ⁹		mai-2011	6,81	/	92,72	56,29	240	295,52	296
LES AUTRES BASSINS VERSANTS DU CAMEROUN		NGAM AVAL ¹⁰	BASALTES + ORTHOGNEISS (600-1,8 ma)	juin-2011	4,21	42,00	174,00	153,00	582,00	567,00	582,00
		NGAM AMONT ¹⁰		juin-2002	8,02	11,00	170,20	91,50	330,26	138,23	175,63
		NDE AMONT ¹¹	GNEISS + GRANITOIDES + AMPHIBOLITES (2,1-0,6 Ga)	Aout-2014	6,80	27,80	147,65	93,08	413,77	366,06	401,32
		NDE AVAL ¹¹		janv-2015	7,19	32,20	49,15	35,38	239,97	-	14,36
		MBAM à GOURA ¹²	GNEISS + BASALTES + GRANITE	1997	7,00	35,00	110,00	97,00	351,00	8,00	347,00
		SANAGA à NATIGAL ¹³		1978	6,7	13,9	4,89	32,92	138,17	22,54	96,72
		NTEM ¹⁴	GNEISS + CEINTURE DE ROCHES VERTES	2011	6,70	13,90	45,00	33,00	138,17	97,00	137,54
		NYONG AVAL ¹⁵	GRANITE + GNEISS (600 ma)	1997	5,79	25,55	108,23	65,02	264,43	33,38	163,94
		MONT CAMEROUN CM13 ¹⁶	LAHARS (1,8 ma à nos jours)	Dec-96	7,57	22,60	78,30	710,29	2098,69	920,00	2890,07



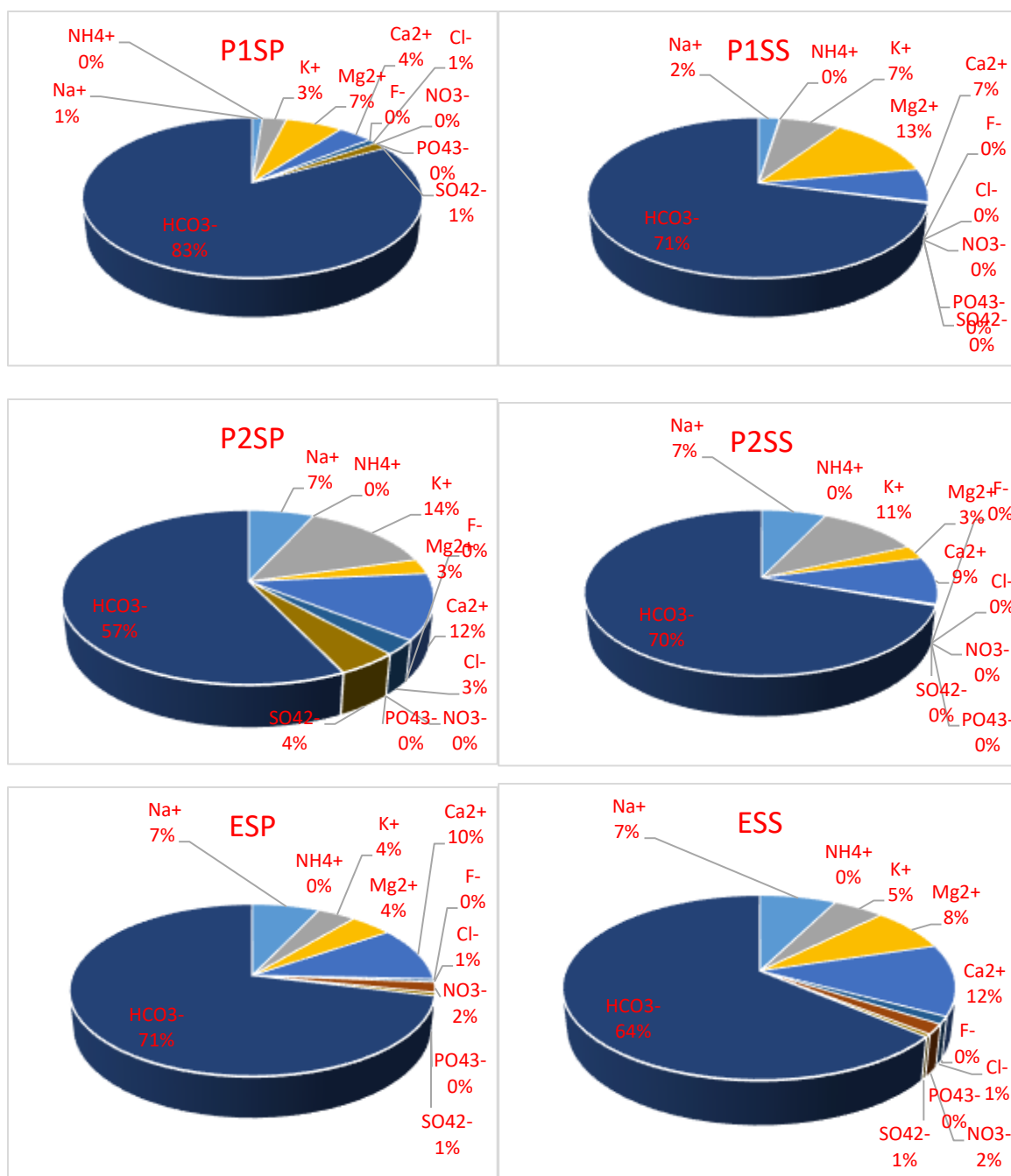


Figure 19 : Proportions moyennes des éléments chimiques dans les eaux du bassin versant amont du Chiémboh.

IV.1.2.4. Faciès hydrochimiques

La représentation graphique de Piper a été utilisée pour donner le faciès de l'eau. Il en ressort que les eaux de la zone d'étude sont en générales du faciès bicarbonatée calcique et magnésienne (Figure 20).

L'ordre de grandeur décroissant des éléments majeurs dans les eaux du bassin versant amont du Chiémboh est le suivant : $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.

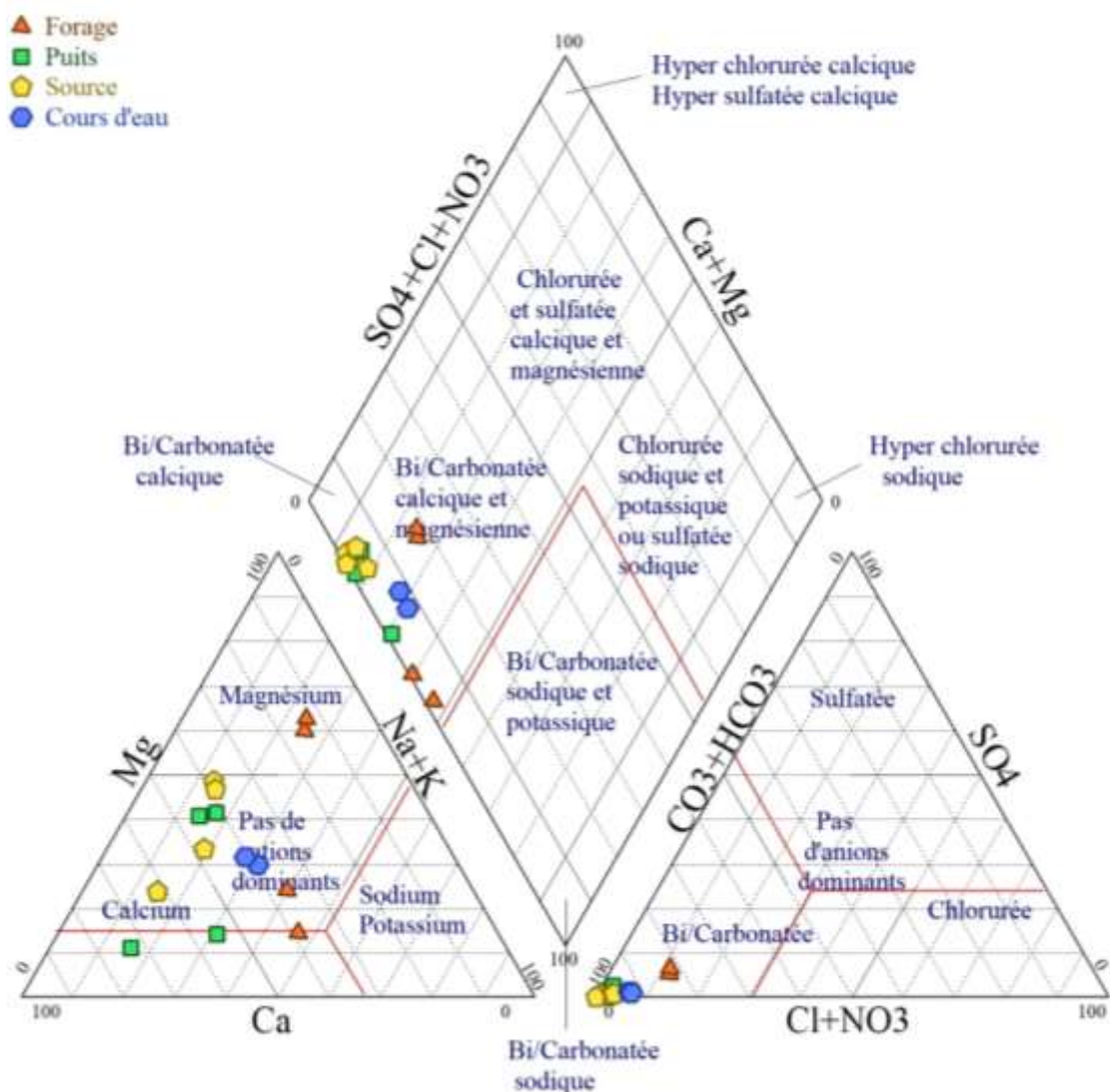


Figure 20 : Diagramme de Piper (1944) des eaux du bassin versant amont du Chiémhùh

IV.2. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES COLONIES BACTERIENNES DANS LES EAUX DU BVAC

Les analyses bactériologiques des eaux du bassin versant amont du Chiémhùh durant la période d'étude (février 2022 et août 2022) montrent que les eaux des sources S1 et S2 sont bien chargées en microéléments bactériologiques en saison sèche (S1 : 105 CF (UCF/100 ml), 90 SF (UCF/100ml) et (S2 : 96 CF (UCF/100 ml)), 85 SF (UCF/100ml) qu'en saison pluvieuse (S1 : 0 CF (UCF/100 ml), (0 SF (UCF/100 ml) et S2 : 3 CF (UCF/100 ml), (5 SF (UCF/100 ml)). Il en est de même pour les puits P1 et P2 (Figure 21). La faible proportion des microéléments bactériologiques (Tableau 10) obtenue en saison pluvieuse dans les eaux soumis aux analyses bactériennes (sources S1 et S2, puits P1 et P2) pourrait s'expliquer par l'augmentation des infiltrations d'eaux de pluies réduisant ainsi la rétention des

microorganismes par l'abaissement de la concentration ionique des eaux, l'élévation de la température et la durée d'ensoleillement pendant cette période favorisent la multiplication des bactéries et leur enrichissement.

Tableau 10 : Origine de la pollution des eaux de sources et de puits dans le BVAC selon le rapport coliforme fécaux/streptocoques fécaux. (R= CF/SF)

R=CF/SF	S1	S2	P1	P2
Saison Sèche	0,66	1,13	1,03	0,81
Saison Pluvieuse	0,00	0,60	0,83	0,89

Légende : R < 0,7 Principalement ou entièrement d'origine animale, R compris entre 0,7 et 1 mixte à prédominance animale, R compris entre 1 et 2 origine incertaine, R compris entre 2 et 4 mixte à prédominance humaine, R > 4 source exclusivement humaine.

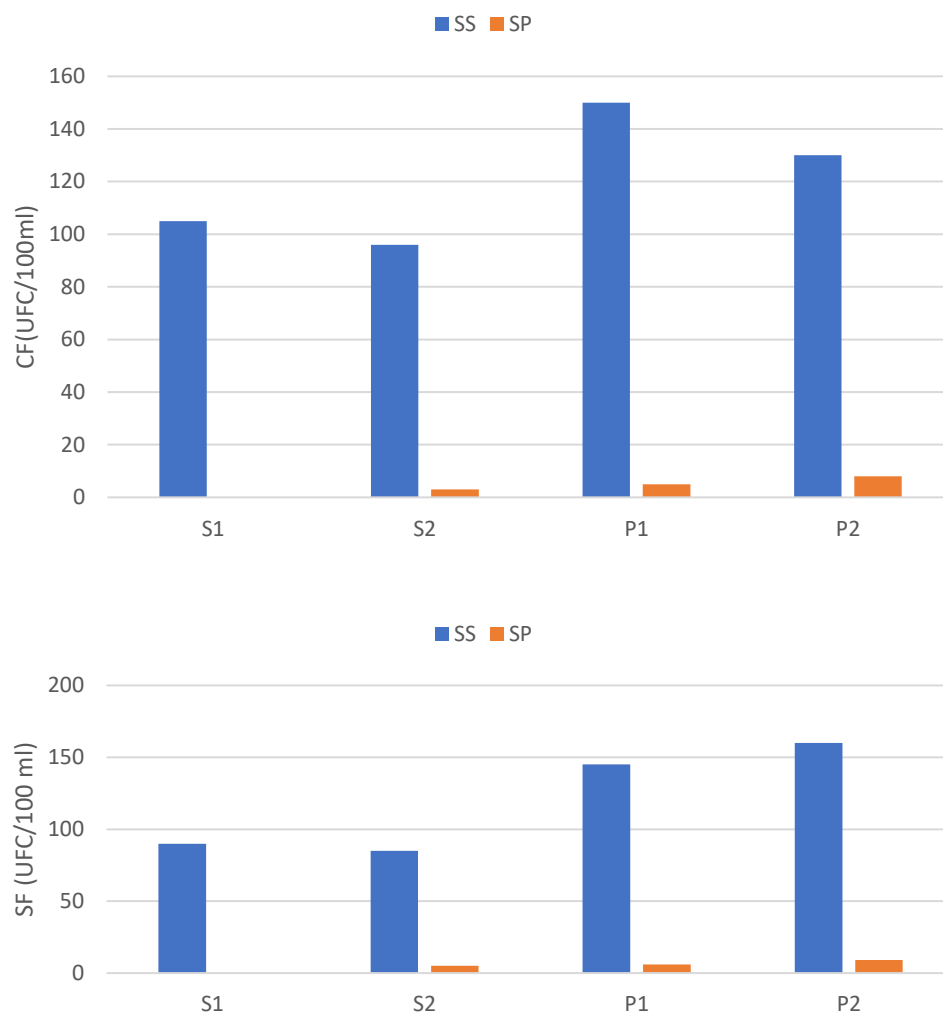


Figure 21 : Variations spatio-temporelles des colonies bactériennes par type d'eau dans le bassin versant amont du Chiémùh.

IV.3. ANALYSE STATISTIQUE ET ORIGINES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET BACTERIOLOGIQUES DANS LES EAUX DU BVAC.

IV.3.1. Matrice de Corrélation

Les coefficients de corrélation relatifs à seize paramètres physico-chimiques (pH, CE, MES, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , F^- , HCO_3^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- , SO_4^{2-} , TZ^+ et TZ) pris deux à deux sont illustrés par la matrice de corrélation (Tableau 11). Cette dernière montre de bonne à très bonne corrélation ($0,70 < R \leq 0,99$) entre TZ^+ et les cations majeurs ; Ca^{2+} , TZ^+ , Cl^- et SO_4^{2-} , CE, Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^- ; CE, Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- et TZ^- . En outre, de bonne corrélation ($0,40 < R \leq 0,70$) s'observe entre Na^+ et K^+ ; Mg^{2+} et Na^+ ; pH, K^+ , Mg^{2+} et F^- ; CE, Ca^{2+} , TZ^+ et Cl^- . Ces différentes corrélations traduisent de l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux de la zone d'étude.

IV.3.2. Analyse en composantes principales (ACP)

D'après la règle de Kaiser-Guttman, 1960 (le nombre des valeurs-propres supérieures à l'unité d'une matrice d'inter- corrélation, est égal au nombre de facteurs à extraire), seuls les deux premiers axes factoriels ou composantes principales F1 et F2 ont été retenus. Ils représentent 60,04 % de la variance totale (Figure 22) et sont repartis comme suit :

- la composante F1 explique 42,46% de la variance totale et présente une charge positive pour pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , F^- , HCO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- et SO_4^{2-} (Tableau 11). Ceci atteste que, la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude est due à la dissolution des silicates et des carbonates ;
- la composante principale F2 explique 17,58 % de la variance totale et est dominée par des charges positives pour pH, K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , F^- , NO_3^- et PO_4^{3-} (Tableau 12). Ce qui traduit la dissolution des silicates et des carbonates ainsi qu'une contamination causée par les activités anthropiques.

Les résultats de l'ACP révèlent donc que la minéralisation des eaux du bassin versant amont du Chiémbùh est d'origines diverses (géogéniques, anthropiques, les apports atmosphériques, biogéniques).

Tableau 11 : Matrice de corrélation entre les variables étudiées dans le bassin versant amont du Chiémboh.

Variables	pH	CE	MES	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	TZ+	F-	Cl-	NO3-	PO43-	SO42-	HCO3-	TZ-
pH	1	0,498	-0,308	0,317	-0,810	0,176	0,469	0,357	0,552	0,585	0,328	0,176	0,350	0,284	0,245	0,256
CE		1	-0,263	0,365	-0,330	0,417	0,263	0,952	0,773	0,458	0,698	-0,368	0,270	0,823	0,824	0,841
MES			1	-0,535	0,035	0,154	-0,472	-0,094	-0,419	0,012	-0,251	-0,010	-0,367	-0,147	-0,076	-0,085
Na+				1	-0,311	0,622	0,656	0,208	0,760	0,454	0,422	-0,234	-0,028	0,257	0,134	0,146
NH4+					1	-0,308	-0,225	-0,246	-0,357	-0,639	-0,232	-0,102	-0,107	-0,123	-0,290	-0,293
K+						1	0,332	0,392	0,631	0,590	0,498	-0,234	-0,290	0,337	0,285	0,297
Mg2+							1	0,006	0,772	0,589	0,305	-0,118	0,236	0,179	-0,212	-0,196
Ca2+								1	0,609	0,323	0,637	-0,404	0,130	0,824	0,873	0,887
TZ+									1	0,678	0,652	-0,353	0,176	0,626	0,383	0,404
F-										1	0,221	-0,398	0,233	0,196	0,271	0,272
Cl-											1	0,168	-0,288	0,871	0,410	0,450
NO3-												1	-0,295	-0,103	-0,426	-0,406
PO43-													1	-0,192	0,314	0,292
SO42-														1	0,577	0,611
HCO3-															1	0,999
TZ-																1

Tableau 12 : Composantes principales des paramètres hydrochimiques du BVAC

	F1	F2
pH	0,230	0,234
CE	0,362	-0,157
MES totales	-0,120	-0,220
Na+	0,229	0,326
NH4+	-0,192	-0,178
K+	0,230	0,108
Mg2+	0,172	0,477
Ca2+	0,326	-0,291
TZ+	0,343	0,211
F-	0,249	0,243
Cl-	0,277	-0,030
NO3-	-0,137	0,117
PO43-	0,077	0,033
SO42-	0,290	-0,185
HCO3-	0,278	-0,361
TZ-	0,285	-0,357

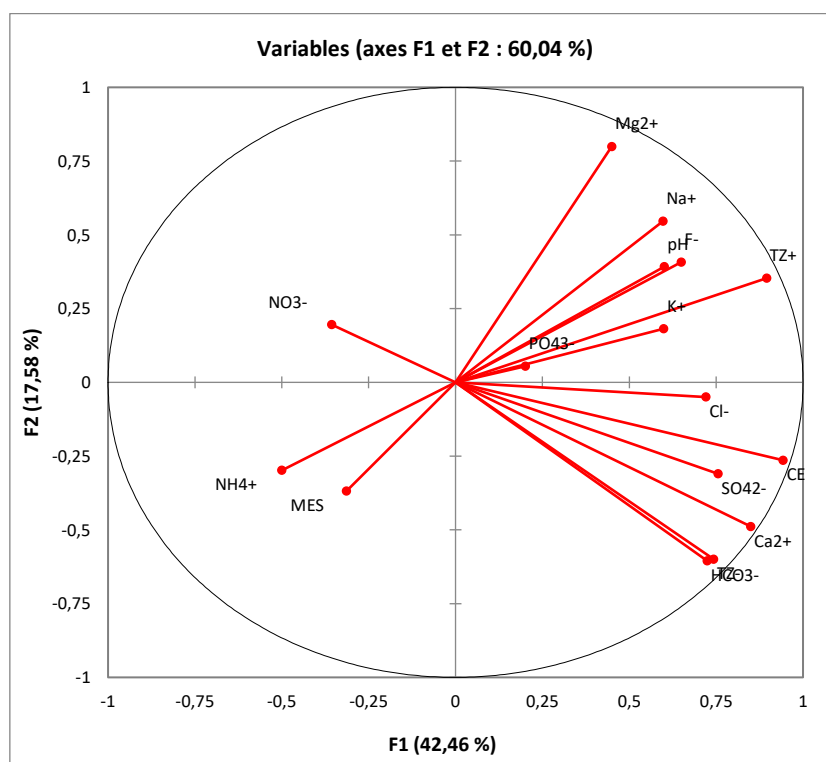


Figure 22 : Projection des paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant amont du Chiémhùh sur le plan factoriel axe1-axe2 de l'ACP (plan factoriel F1 – F2)

IV.3.3. Origines des paramètres physico-chimiques

La composition chimique des eaux du BVAC est dans l'ensemble liée à la composition minéralogique des roches (orthogneiss indifférenciés, Gneiss migmatitique, granitoïdes et orthogneiss granitiques, granites, monzonites et monzogranites) qu'elles drainent, aux apports atmosphériques, à la végétation et aux activités anthropiques. Les cations sont principalement produits au cours de l'interaction eau-roche par l'équation suivante :

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

Les ions calcium (Ca^{2+}) pourraient provenir de l'hydrolyse de l'anorthite (minéral de haute température de la série des plagioclases) à la kaolinite (équation 1, annexe 10). Par ailleurs les amphiboles ($\text{Ca, Mg, Fe, Al, Na}$) $7\text{Si}8\text{O}_{22}(\text{OH})$, constituants minéralogique des rhyolites retrouvés dans la zone d'étude sont de la famille de minéraux silicates de fer, de calcium, de magnésium, ou de magnésium. L'hydrolyse, l'hydratation ou l'oxydation de ces amphiboles serait à l'origine du calcium retrouvé dans le milieu.

Les ions ammonium, ils proviendraient essentiellement des activités anthropiques, mais aussi de la dégradation incomplète de la matière organique. Ainsi, les ions ammonium contenus dans les eaux du bassin versant amont du Chiémboh tiennent leur source des activités agricoles pratiquées dans toute la zone, tant en saison sèche qu'en saison pluvieuse.

Les ions sulfates proviendraient de l'altération des minéraux sulfureux ou sulfatés. En effet la dissolution ou l'oxydation de la pyrite produit du sulfate et des oxydes de fer (équation 7, annexe 10). Ils peuvent aussi provenir des actions anthropiques par l'utilisation des engrais, toute la grande zone d'étude étant fortement cultivée avec l'emploi de ces engrais minéraux (sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) chimiques et organiques.

Les nitrates (NO_3^-) sont en grande majorité issues des activités anthropiques avec l'utilisation des engrais minéraux (sulfate d'ammonium : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, cyanamide calcique (CaCN_2), urée, ammonitrate (NH_4NO_3)), des engrais organiques, des herbicides et des pesticides pour la culture maraichère en saison sèche dans la grande zone marécageuse, et en saison pluvieuse dans la zone non marécageuse. Ils auraient également une origine atmosphérique (oxydation de l'azote atmosphérique), biogénique (dégradation microbienne par nitrification).

Les chlorures proviendraient des apports atmosphériques, biogéniques (recyclage des végétaux) et anthropiques par l'utilisation des intrants agricoles (pesticides, herbicides) ainsi que par chloration des eaux. Dans les eaux du bassin versant amont du Chiémboh les ions

chlorures proviennent majoritairement des apports anthropiques puisque la zone est fortement agricole.

Les fluorures proviendraient de l'hydrolyse des minéraux ferromagnésiens tels que la biotite $K(Mg, Fe)_3(SiO_3AlO_{10}(OH, F)_2)$ et de la lixiviation des sols ferralitiques. Ils peuvent aussi provenir des apports atmosphériques par les pluies.

Les MES proviennent des apports atmosphériques essentiellement des précipitations, des substances continentales résultant de l'érosion des sols, l'altération chimique des roches sous-jacentes et aussi des éléments biogéniques comme l'indique les résultats de l'analyse multivariée.

IV.3.4. Origines des paramètres bactériologiques dans les eaux du BVAC

L'intérêt de la détection de ces bactéries (CF, SF), à titre d'organismes indicateurs, réside dans le fait que leur survie dans l'environnement est généralement équivalente à celle des bactéries pathogènes et que leur densité est généralement proportionnelle au degré de pollution produite par les matières fécales. En effet, ces bactéries ne se multiplient pas dans l'environnement, mais uniquement dans le tractus digestif de l'homme, des animaux à sang chaud et aussi dans les sols et les débris végétaux. C'est une preuve indiscutable d'une contamination d'origine fécale. Jagals et al. (1995) et Rodier (1996) confirment cette observation notant que le rapport CF/SF pour la source S1, durant les deux saisons et la source S2 en saison pluvieuse inférieur à 0,7, la contamination est principalement ou entièrement d'origine animale, mixte à prédominance animal pour le puits P1 pendant les deux saisons et le puits P2 en saison pluvieuse ($0,7 \leq R \leq 1$) et d'origine incertaine pour la source S2 et le puits P1 en saison sèche ($1 \leq R \leq 2$).

IV.4. PRINCIPAUX FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX CONTROLANT LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DANS LE BVAC

Plusieurs facteurs complémentaires sont à l'origine de la dégradation des ressources en eau dans le BVAC, Il s'agit entre autres : la géologie (lithologie et sol), le relief, le type d'aquifère et nappe, et l'anthropisation.

IV.4.1. Géologie

IV.4.1.1. Lithologie

La qualité des eaux agit en fonction de la nature des roches traversées, de leur texture et de l'âge de celles-ci. Le socle du BVAC est lithologique cristallin-cristallophyllien d'âge

précambrien constitué de roches plutoniques (granites d'anatexie et syntectonique) et/ou métamorphiques (orthogneiss, mylonite, gneiss à biotite et amphibole,) sur lesquelles sont localisées des épanchements volcaniques constitués pour la plupart des basaltes de plateau (Wandji, 1995 ; Moundi et al., 2007 ; Wandji et al., 2008 ; Mouncherou, 2016). Les réactions chimiques de dissolution de ces roches dépendent de leur composition chimique et de leur structure minéralogique. D'après les travaux de Meybeck (1987) sur la composition chimique des eaux de rivières de France drainant différents types de roches, l'ordre d'altérabilité croissant des roches silicatées est le suivant : (granite, gneiss et micaschistes) < (gabbro, grès) < (roches volcaniques) << (roches carbonatées) <<< (évaporites). C'est ce qui explique un pH acide car ces roches contiennent peu de minéraux basiques.

IV.4.1.2. Sol

Les sols ferralitiques occupent la quasi-totalité du BVAC, sont très épais et ne permettent pas aux eaux d'atteindre facilement la roche mère ni d'influencer facilement celle-ci et par conséquent la composition chimique des eaux. Ainsi la résistance d'un sol à la désagrégation et au transport de ses éléments dépend du type de sol, de son épaisseur et de son tassement. Les propriétés physiques des sols conditionnent l'intensité de l'altération (Duchaufour, 1984). Le sol régule ainsi les interactions entre les agents d'érosion et le substratum rocheux.

IV.4.2. Type d'aquifère et de nappe

Le BVAC est majoritairement constituée des sources de déversement (latrine à fond perdu, dépôt d'ordure) qui captent la nappe et/ou l'aquifère libre. Ces nappes sont exposées à de infiltrations des eaux d'écoulement et des eaux météoriques chargées des produits indésirables qui sont des agents des pollutions, contrairement aux aquifères et nappes captives qui ne sont vulnérables car le toit et le mur sont imperméables. Ce qui expliquent les fortes concentrations de MES et des éléments chimiques dans les ouvrages hydrauliques. Ces eaux communiquent directement avec de latrine à fond perdu qui sont les plus représentés dans la zone et les résultats immédiats sont la présence des colonies des bactéries dans les puits et les sources.

IV.4.3. Relief

Le relief assez fort du BVAC contrôle le temps de contact eau-roche. Ce qui fait que sous l'effet de la dénivellation, les cours d'eaux dévalent à grande vitesse les pentes, des collines entraînant avec elles d'énormes quantités de matières dissoutes et solides qui arrivent dans les vallées où l'écoulement est généralement laminaire. Cet écoulement est fonction des apports

atmosphériques rejoignent les cours d'eau par l'intermédiaire des précipitations liquides et même solides. Sachant qu'une portion de la population défèque dans la nature et que certains déchets sont déversés sur les berges des cours d'eau, ces excréta vont se retrouver par le biais de ruissellement. C'est ainsi que la pente va donc impacter l'écoulement, qui a son tour influence l'altération chimique en faisant varier le flux spécifique de matières en suspension de certains éléments biogéniques (ammonium, nitrate, coliformes et streptocoques fécaux etc.), (Mfonka, 2011). Des fortes concentrations de matières dissoutes minérales, organiques et inorganiques observées dans le puits (P1) qui est situé près de la vallée et le cours d'eau Chiémbùh dont la pente est très faible explique bien aisément ce processus.

IV.4.4. Anthropisation

Les apports anthropiques sont liés aux rejets domestiques et industriels, aux activités agropastorales. Les déchets domestiques déversés dans la nature rejoignent les ruisseaux et les mares au cours des événements pluvieux et terminent leur parcours dans l'aquifère à nappe libre. A cela s'ajoutent les fosses d'aisance à fond perdu dont la profondeur entre en contact avec le niveau piézométrique de la nappe. C'est ce qui explique la présence de bactéries pathogènes dans les eaux du BVAC. Les nitrates proviennent des intrants agricoles utilisés par l'homme pour maintenir sa productivité malgré que depuis quelques années, leur participation à la dégradation de la qualité des eaux ait clairement été démontrée Schiavon et *al.* (1995). Ils peuvent aussi provenir des eaux des salles de bains et de lessive qui renferment des savons et des détergents.

IV.5. QUELQUES SOLUTIONS PROPOSEES POUR ATTENUER LA VULNERABILITE DES EAUX DU BVAC

Partant des résultats d'analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux du BVAC présentés (Tableau 13) ci-dessous, on s'aperçoit que les eaux souterraines sont soumises à une pollution de type biologique. Compte tenu de l'origine de ces pollutions et de leurs conséquences socioéconomiques, les solutions envisageables pour leur diminution peuvent être entre autres la protection des eaux du BVAC en général et plus particulièrement les eaux souterraines (sources et puits) qui sont consommées contre les sources de pollutions diverses. La décontamination étant très difficile, cette situation contraignante interpelle toutes les parties prenantes (pouvoirs publics, ONG et les collectivités territoriales décentralisées) à agir par des méthodes préventives au moyen d'une réglementation basée sur les recherches et les expérimentations. La protection de la nappe est d'autant meilleure que la zone non saturée est épaisse et que la vitesse de percolation de l'eau dans la nappe est faible (Fomegni, 2009). Hormis

ces facteurs naturels de protection des eaux souterraines contre les polluants, on peut également citer :

- le traitement de ces eaux avant toute consommation humaine (filtration, neutralisation avec une solution basique, chloration, etc) ;
- la mise en place des périmètres de protection autour des points de captages d'eau ;
- la construction des fosses septiques /latrines étanches qui n'atteignent pas les nappes d'eau souterraine ;
- la construction des ouvrages hydrauliques qui captent les nappes captives profondes au détriment des nappes libres de subsurface beaucoup plus vulnérables par rapport aux activités anthropiques ;
- la sensibilisation et l'éducation des populations riveraines, administratives et les collectivités territoriales décentralisées sur l'adoption de bonnes pratiques d'hygiène à l'instar de la construction des enclos pour les animaux.

Tableau 13 : Classe de la qualité des eaux de puits et des sources et propositions de mesure de traitement (Djeuda Tchapnga et al.,1999)

C.FUFC/100ml	S.F UFC/100ml	Qualité des eaux	Mesures sanitaires proposée
0-20	0-20	Très bonne	Simple protection
0-20	20-200	Assez bonne	Surveillance (pollution ancienne)
20-200	20-200	Moyenne	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

Résumé

Parvenu au terme de cette étude, il en ressort que les eaux du BVAC sont acides et faiblement à très faiblement minéralisées. Les variations spatiotemporelles et les analyses statistiques des minéraux dissous observées illustrent qu'ils ont des origines diverses : géologiques, anthropiques, biogéniques et atmosphériques. Sur le plan bactériologique, la présence des Coliformes fécaux, des streptocoques fécaux dans les eaux souterraines (puits et sources) sont des indicateurs d'une pollution essentiellement biologique d'origine humaine, animales et mixte. Ainsi, toutes ces eaux nécessitent un traitement préalable avant toute consommation humaine.

**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE

Le bassin versant amont du Chiémbeh (BVAC), site retenu pour la présente étude, est situé dans le plateau Bamoun (Ouest-Cameroun) entre les latitudes 5°41' et 5°44' Nord et les longitudes 10°52' et 10°55' Est. Le climat qui y règne est de type tropical humide de montagne avec la présence d'une savane herbacée et arborée, constituée d'arbres de tailles variées. Il est à deux saisons inégalement réparties, caractérisées par une longue saison des pluies allant de mi-mars à mi-novembre et une courte saison sèche allant de mi-novembre à mi-mars. La végétation prédominante est une savane avec une faune diversifiée. Le substratum rocheux est constitué par un socle lithologique cristallin-cristallophyllien d'âge précambrien constitué de roches plutoniques et/ou métamorphiques sur lesquels se développent les sols peu évolués, ferralitiques (jaunes et/ou rouges) et hydromorphes. Les principales activités socio-économiques pratiquées par les populations riveraines sont surtout l'agriculture, l'élevage, l'artisanat, la pêche, le commerce et le tourisme.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer les impacts lithologiques et anthropiques sur la qualité des eaux du BVAC dans le plateau Bamoun. Pour y parvenir, la méthodologie adoptée a consisté à la recherche bibliographique et documentaire, aux investigations tant sur le terrain (reconnaissance du site et de sa géologie, échantillonnage des eaux souterraines et d'écoulement) qu'en laboratoire (acquisition des caractéristiques physiographiques, réalisation des cartes géologiques, analyses des paramètres physico-chimiques et bactériologiques, traitement et synthèse de données acquises sur le terrain et en laboratoire).

Sur le plan physiographique, le BVAC a une superficie de 28,55 km², un périmètre de 24,75 km et un indice de compacité de 1,30 lui conférant une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent de longueur 9,35 km et de largeur 3 km. Son relief est caractérisé par l'alternance des collines et des vallées occupées par une large zone marécageuse avec des altitudes comprises entre 1080 m et 1220 m. Le cours d'eau Chiémbeh coule du nord-ouest vers le sud-est dans un réseau hydrographique de type dendritique pour se déverser dans la rivière Mfû après 18 km de parcours.

Sur le plan physico-chimique, les eaux du BVAC sont acides ($4,38 \leq \text{pH} \leq 6,35$), faiblement à très faiblement minéralisées ($7,6 \leq \text{CE} \leq 180,2 \mu\text{S/cm}$, $124,60 \leq \text{TZ}^+ \leq 1346,65 \mu\text{eq/l}$). A l'échelle spatiotemporelle, les eaux souterraines sont relativement plus acides que celles de surface (cours d'eau Chiémbeh). Un seul faciès hydrochimique a été identifié dans l'ensemble des points d'eau du dit bassin : bicarbonaté calci-magnésien. Les concentrations en cations majeurs après hydrolyse sont beaucoup plus élevées dans les eaux souterraines et aussi

bien en saison sèche qu'en saison de pluie. Quant aux anions majeurs (Cl^- et NO_3^-) ils sont plus élevés en saison de pluie qu'en saison sèche. Ces concentrations sont dans l'ensemble situées en deçà des normes prescrites par l'OMS et l'ANOR. L'analyse statistique (matrice de corrélation et analyse en composantes principales) ne présentent pas trop de corrélation significative entre les éléments physicochimiques et de regroupement aux pôles.

Sur le plan bactériologique, les eaux souterraines sont marquées par la présence des coliformes et streptocoques fécaux, traduisant d'une pollution fécale surtout animale. Ces colonies bactériennes sont plus élevées en saison sèche dans les puits due à l'évapotranspiration et en saison pluvieuse dans les sources, grâce au ruissellement.

Il en ressort de cette étude que, la qualité des eaux du BVAC est conditionnée par les facteurs environnementaux que sont : la géologie par l'altération des basaltes et rhyolites et le lessivage des sols pour la plupart des éléments physicochimiques (pH, C.E, cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+)), les types d'aquifères et de nappes, le relief et/ou les activités anthropiques par les pratiques agricoles (utilisation des intrants agricoles NPK), l'élevage, les rejets solides et liquides et l'insuffisance dans le système d'assainissement pour les ions Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , PO_4^{3-} , F^- et les paramètres bactériologiques (CF et SF). Ces eaux sont dans l'ensemble polluées sur le plan bactériologique et exigent au préalable un traitement approprié avant toute consommation humaine.

A l'issue de ce travail, afin de mieux contribuer à la gestion durable des ressources en eau dans ce bassin, plusieurs actions peuvent être faites : le traitement de ces eaux avant toute consommation humaine ; la mise en place des périmètres de protection autour des points de captages d'eau ; ensuite la construction des fosses septiques /latrines étanches qui n'atteignent pas les nappes d'eau souterraine ; la construction des ouvrages hydrauliques qui captent les nappes captives profondes au détriment des nappes libres de subsurface beaucoup plus vulnérables par rapport aux activités anthropiques ; et enfin la sensibilisation et l'éducation des populations riveraines, administratives et les collectivités territoriales décentralisées sur l'adoption de bonnes pratiques d'hygiène a l'instar de la construction des enclos pour les animaux.

PERSPECTIVES

Dans le but de plus enrichir les travaux entamés dans ce bassin versant, quelques perspectives envisagées sont les suivantes :

- effectuer des prélèvements en resserrant les fréquences d'échantillonnage dans le temps (un à deux fois par mois) et pendant une longue période (au moins deux années hydrologiques) en prenant en compte plusieurs types d'eaux souterraines et cours d'eau et les autres éléments chimiques tels que les éléments en traces, la DBO5, la DCO et les isotopes ;
- quantifier le flux des matières dissoutes et particulaires (minérales et organiques) afin d'évaluer le taux d'altération chimique et d'érosion mécanique actuels dans le BVAC ;
- élargir le champ de recherche aux études hydrologiques, climatologiques et hydrogéologiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdoulkadri, A. M. (2015).** Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 9(1): 517-533.
- Atouba, L. C. O., Chazot, G., Moundi, A., Agranier, A., Bellon, H., Nonnotte, P., Nzenti, J. P., Kankeu, B. (2016).** Mantle sources beneath the Cameroon Volcanic Line: geochemistry and geochronology of the Bamoun plateau mafic rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-12.
- Bagnouls, F., Gaussen, H. (1957).** Les climats biologiques et leur classification. In *Annales de géographie* (Vol. 66, No. 355, pp. 193-220).
- Banton, O., Bangoy, L. M. (1997).** Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presses de l'Université du Québec, AUPELF-UREF, 460p.
- Boeglin, J. L., Ndam Ngoupayou, J. R., Braun, J. J. (2003).** Composition of the different reservoir waters in a tropical humid area: example of the Nsimi catchment (Southern Cameroun). *Journal of African Earth Sciences*. 37, 103-110.
- DE, Martonne. (1942).** Nouvelle carte mondiale de l'indice d'aridité (Carte hors texte). In *Annales de Géographie* (Vol. 51, No. 288, pp. 241-250).
- Delor, C., Bernard, J., Tucker, R. D., Roig, J. Y., Bouyo, H. M., Couëffé, R., Blein, O. (2021).** Carte géologique du Cameroun à 1 / 1 000 000. Deuxième édition.
- Detay. (1993).** Forage d'eau (réalisation, entretien et minéralisation). Edition, Masson, Paris, 280 p.
- Fomegni, J. C. (2009).** Qualité bactériologique de la nappe phréatique et des effluents dans le bassin versant de BESEKE à BANABERIE (zone industrielle de Douala). Mémoire D.E.A, Université de Yaoundé I, 80 p.
- Houemenou, H. (2020).** Qualité des eaux souterraines et de surface dans une la métropole de Cotonou au sud du Bénin : Implications pour la leptospirose. Thèse de Doctorat, Hydrogéologie, Université d'Avignon, 131p.
- Kamgang, P. (1986).** Contribution à l'étude géochimique et pétrologique du Nkogham (pays Bamoun, Ouest-Cameroun). Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université de Yaoundé I, Cameroun 315p.
- Mboubda, J. C. (2014).** Caractérisation physiographique et hydrogéochimique d'un système hydrologique en milieu volcanique : exemple du bassin versant du Panké (Ouest Cameroun). Mémoire Master II, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 83p.
- Mboumbouo, I. (2006).** Influence de la lithologie sur la qualité des eaux de source et d'écoulement du plateau bamoun : cas de Sahgouo, Mfesseh et Ngaguhem situées dans la ville de Foumban (Ouest-Cameroun). Mémoire Master 2, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 57.

- Mfochivé, O. F., Bustillo, V., Ekodeck, G. E. (2020).** Dynamics of fluvial suspended sediment transport and yield in volcanic highland's agricultural basin: case of the Noun River, Western Cameroon, 116p.
- Mfonka, Z., Kpoumié, A., Ngouh, A. N., Mouncherou, O. F., Nsangou, D., Rakotondrabe, F., Fouépé Takounjou, A., Zammouri, M., Ndam Ngoupayou, J. R., Ndjigui, P. D. (2021).** Water Quality Assessment in the Bamoun Plateau, Western-Cameroon: Hydrogeochemical Modelling and Multivariate Statistical Analysis Approach. *Journal of Water Resource and Protection*, 13(2), 112-138.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, J. R., Kpoumié, A., Ndjigui, P.D., Zammouri, M., Ngouh, A. N., Mouncherou, O. F., Mfochivé, O. F., Rakotondrabe, F. (2019).** Hydrodynamic and ground water vulnerability assessment of shallow aquifer of the Fouban locality (Bamoun Plateau, Western-Cameroon). *Arabian Journal of Geosciences* 12(5), 165p.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, J. R., Ndjigui, P-D., Zammouri, M., Kpoumie, A., Rasolonana, E. (2015).** Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun) *Int. J. Biol. Chem Sci.*, 9(4) : 2000-2018. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.39>
- MINEE, GWP-Cmr. (2009).** Etat des Lieux du secteur de l'eau au Cameroun : Connaissances et Usages de Ressources en Eau (Tome1). Technical Report, Yaoundé, 184p.
- Moluh, N. S. (1999).** Contribution à l'étude pétrographique des basaltes fissuraux du secteur Fouban-Est (Plateau Bamoun, Ouest-Cameroun. Mémoire DIPES II, Ecole Normale Supérieure de Yaoundé I, 42p.
- Mouncherou, O.F. (2016).** Hydrogéochimie des systèmes d'aquifères du plateau Bamoun., Cameroun 192p.
- Mouncherou, O. F. (2013).** Hydrogéochimie des systèmes d'aquifères associés aux roches volcaniques et aux sources minéralisées du plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC). Thèse de Doctorat/ Ph.D, Faculté des Sciences Université de Yaoundé I, 57p.
- Mouncherou, O. F., Moundi, A., Ndam Ngoupayou, J. R., Ako, A., Wandji, P. (2011).** Paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC) ; Review of the bulgarian geological society 72(3), 67-78.
- Mouncherou, O. F., Moundi, A., Njikeu, O., Foupouagnigni, Mfonka, Z., Mfochivé, F. O., Tonga, J. C., Ndam Ngoupayou, J. R., Tagne, A. (2018).** Vulnérabilité des aquifères de la plaine volcanique du Noun aux activités agricoles (Ouest-Cameroun). *Journal of Water and Environmental Sciences (JWES)*.

- Moundi, A. (2004).** Les basaltes du plateau bamoun : pétrologie, géochimie et géochronologie ; implication sur les sources des magmas, leurs contexte et évolutions géodynamiques. Thèse Doc. Etat. Univ. Ydé I, 259p.
- Moundi, A., Wandji, P., Bardintzeff, J. J., Atouba Okomo, L. C., Mouncharou, O. F., Reusser, E., Bellon, H., Tchoua, F. (2007).** Les basaltes éocènes à affinité transitionnelle du plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la ligne Volcanique du Cameroun. C.R. Géosciences, 339 : 396-406.
- Moupou, M. (1999).** L'homme et le milieu dans le processus de transformation des paysages en pays Bamoun. Géologie et environnement au Cameroun, Vicat J. P. et Bilong P., éditions, collecte. Géocam, 2/1999, press Université de Yaoundé I, p 23-36.
- Musy, A. (2004).** Cours d'hydrologie générale. Section SIE et GC. 4e semestre. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM). Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement. (ISTE). Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).
- Nap Njiemessa, F.N. (2017).** Caractérisation hydrodynamique et vulnérabilité des eaux souterraines (sources) de Foumban (Ouest-Cameroun). Mémoire Master II, Université de Yaoundé I.
- Ndam Ngoupayou, J. R. (1997).** Bilans hydrochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique : exemple du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé au réseau hydrographique du Nyong et de la Sanaga (Sud Cameroun). Thèse de Doctorat Université de Paris IV, 214 p.
- Ndam Ngoupayou, J. R., Dzana, J. G., Kpoumie, A., Ghogomu, R. T., Fouepe Takounjou, A., Braun, J. J., Ekodeck, G. E. (2016).** Present-day sediment dynamics of the Sanaga catchment (Cameroon): from the total suspended sediment (TSS) to erosion balance. *Hydrological Sciences Journal*, 61(6), 1080-1093.
- Ngnatcha, Y. C. (2019).** Détermination des caractéristiques physiques, hydrodynamique et la qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Ngouoh-Ngouoh à Foubot (Ouest-Cameroun). Mémoire Master II, Université de Yaoundé I.
- Ngouoh, A. N. (2012).** Hydrodynamique et qualité des eaux des nappes dans le bassin versant du Nkié : secteur Nord de la ville de Yaoundé-Cameroun. Mémoire Master II Université de Yaoundé I, 75p.
- Njinwouo, L. R. G. (2016).** Hydrologie et qualité physico-chimique des eaux du Noun à Bayomen. Mémoire MasterII, Université de Yaoundé I, 60p.
- Njofang, C. (2007).** Eléments en traces dans les sédiments, les sols et les plantes comestibles dans le bassin versant du Noun (Cameroun) : Base pour une gestion géochimique de l'environnement. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle Université de Yaoundé 1, 300p.

- Njoya, A. (2007).** Etude du gisement de kaolin de Mayouom (Ouest-Cameroun) : Cartographie, minéralogie et géochimie. Thèse de Doctorat /PhD Université de Yaoundé I, 185p.
- Nouvelot, J. C. (1971).** Hydrologie du bassin versant du Noun. Cah.ORSTOM, 314p.
- Nsangou, D. (2017).** Etude de la vulnérabilité des Ressources en eau du Bassin Versant du Mfu sur le plateau Bamoun (Ouest-Cameroun). Mémoire de Master II, Université de Yaoundé I, 60p.
- Olivry, J. C., Naah, E. (1978).** Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun méridional. Rapp. ONAREST, paris, 733p.
- PCD. (2011).** Plan communal de développement (PCD) de Foumban. Rapport final, 242p.
- Rodier, J. (1996).** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^e édition Dunod, Paris.
- Rodier, J. (2009).** Analyse de l'eau. Dunod, 9^{ème} éditions, Paris, 1579 p.
- Sendjoun, K. G. B. (2014).** Qualité physico-chimique des eaux d'écoulement de la zone forestière du Sud-Ouest du Cameroun. Mémoire Master II, Université de Yaoundé I, 63p.
- Sighomnou, D. (2004).** Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 290p.
- Tapon, N. A. (2011).** Variabilité hydro-climatique des eaux du bassin versant de la Mapé à Magba (Ouest-Cameroun). Mémoire Master II, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I, 70p.
- Tita, M. A. (2008).** Water pollution of the Nkoup river system and its environmental impact on Foumbot town (Western Cameroun) Thèse de Doctorat /PhD Université de Yaoundé I. 194p.
- Tsalefac. (1991).** Convention et formation végétales au Cameroun, veille climatique, collection Sciences Technologie Développement (STD), N° ISSN 1144-2026, pp 127-145.
- UNESCO. (2019).** Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, 336p.
- Wandji, P. (1995).** Le volcanisme récent de la plaine du Noun (Ouest Cameroun. Volcanologie, Pétrologie, Géochimie et Pouzzolanité. Thèse de Doctorat d'Etat Université de Yaoundé I, 295p.

ANNEXES

Annexe 1 : Approvisionnement en eau dans la ville de Foumban



a) Source S1 située à Mambèn chefferie.



b) Source S2 située derrière l'INIEG de Foumban

Annexe 2 : Echantillonnage du forage F1 dans la localité de Mayoum.



Annexe 3 : Echantillon des eaux du bassin versant amont du Chiémbeh de février 2022



Annexe 4 : Principes et modes opératoires d'analyses chimiques : Spectrométrie et chromatographie

Le principe de la spectrométrie ICP-AES est basé sur l'ionisation de l'échantillon en y injectant dans un plasma d'argon ou d'hélium par une sorte de flamme extrêmement chaude (jusqu'à 8000 K) puis les atomes ionisés retournent à l'état fondamental, ils émettent un photon dont l'énergie est caractéristique de l'élément. Quant à la chromatographie HLPC, elle consiste à placer les échantillons et les étalons dans un passeur automatique qui éjecte l'échantillon dans la colonne d'analyse. À partir d'un logiciel (le chroméléon), les résultats apparus sur l'écran d'ordinateur sont transformés en teneur. Cette méthode est basée sur le temps de rétention des ions par 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.

Annexe 5 : Principe et protocoles de mesure des colonies bactériennes (Coliformes et streptocoques fécaux) dans les eaux

a) Principe

Son principe est basé sur l'identification des bio-indicateurs de contamination fécale que Rodier (1978) définit comme des bactéries d'habitat fécal normal et exclusif.

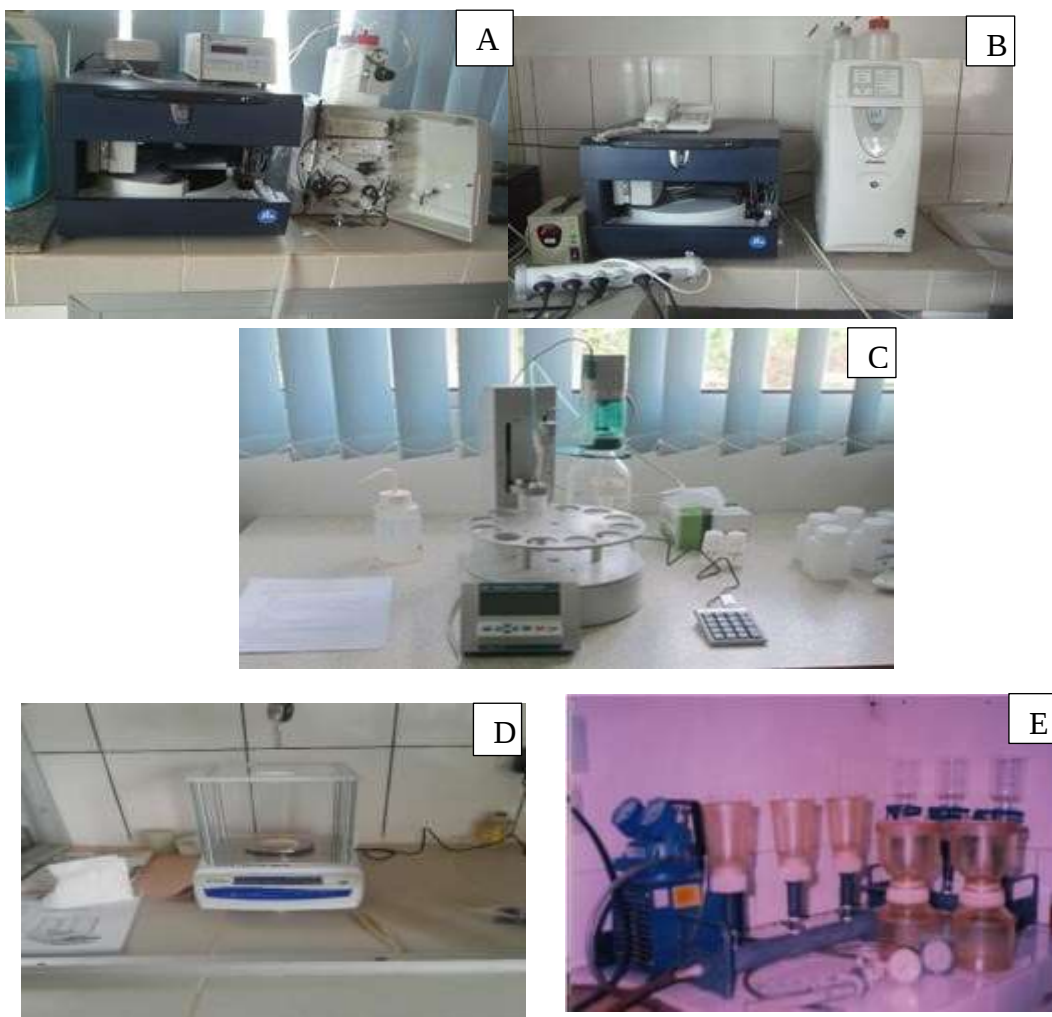
b) Protocole

Après avoir préparé la gélose (milieu sélectif), on la conserve en zone stérile et on la coule dans des boîtes de pétri stériles petits diamètres qu'on laisse refroidir avec son couvercle en parti ouvert. Quand la gélose devient solide (après avoir stérilisé et conservé dans le papier aluminium du système de filtration) on procède 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° C puis 44°C, les colonies comptées sont exprimées en UFC (Unité Formant Colonies) pour 100 ml d'eau. Le principe de la mesure est le même pour 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 autre que les colonies de streptocoques. La lecture et la confirmation des colonies typiques identifiées : Les colonies bleues pour les coliformes fécaux, les colonies reflets verts métalliques pour les coliformes

totaux, et les colonies rouges à roses pour les streptocoques et enfin le dénombrement des colonies reconnues sur membranes quadrillées.

$$UFC = \frac{\text{Nombre de colonies comptées}}{\text{volume d'échantillon filtré (ml)}} \times 100$$

Annexe 6 : Quelques appareils de mesure et d'analyse chimiques et bactériologique en laboratoire (Laboratoire d'Analyses Géochimiques des Eaux de Nkolbisson)



A) Chromatographie ionique ICS-90, pour analyse des cations majeurs, **B)** Chromatographie ionique ICS-100, pour analyse des anions majeurs), **C)** Titrteur automatique, **D)** Balance précision 1/1000, **E)** matériel de filtration en laboratoire.

Annexe 7 : Variations spatio-temporelles des paramètres physiques dans les eaux du BVAC.

	Paramètres physiques		pH	CE (µS/cm)	MES (mg/L)
Eaux souterraines	F1	sp	6,08	70,4	5
		ss	5,62	52	5,6
	F2	sp	6,01	60,3	3,4
		ss	5,51	49,8	5,2
	P1	sp	6,06	180,2	10,3
		ss	5,6	59,5	45,12
	P2	sp	5,46	25,1	15,3
		ss	5,44	30,2	27,2
	S1	sp	4,38	7,6	14,5
		ss	6,12	17,8	13,6
	S2	sp	6,35	78,5	1,8
		ss	6,09	89	0,6
Eaux de surface	E	sp	5,87	26,4	29,8
		ss	5,9	45,3	3,4

Légende : SS : saison sèche ; SP : saison de pluies.

Annexe 8 : Variations spatio-temporelles des paramètres chimiques dans les eaux du BVAC

Samples	Na+	NH4+	K+	Mg2+	Ca2+	TZ+	F-	Cl-	NO3-	PO43-	SO42-	HCO3-	TZ-
F1 sp	215,22	0,00	107,69	775,00	189,00	1286,91	3,68	16,34	3,06	0,00	8,75	137,70	165,86
F1 ss	201,30	0,00	76,41	171,67	254,50	703,88	2,11	2,82	0,32	0,00	0,83	655,74	659,71
F2 sp	225,22	0,00	97,44	845,00	179,00	1346,65	3,42	18,93	2,69	0,00	12,71	157,43	191,76
F2 ss	213,91	0,00	94,10	96,67	256,00	660,68	2,26	10,20	0,48	0,00	0,88	642,62	654,18
P1 sp	121,74	0,00	87,18	145,83	971,00	1325,75	2,63	32,11	0,00	0,00	38,54	1436,07	1506,72
P1 ss	51,30	0,00	148,72	91,67	355,00	646,69	3,68	5,63	0,00	0,00	1,04	647,54	654,22
P2 sp	24,78	0,00	9,74	100,00	109,00	243,53	1,58	4,79	2,58	0,00	0,21	296,72	304,30
P2 ss	42,61	0,00	12,56	135,00	132,50	322,67	3,16	2,25	0,00	0,00	1,25	385,25	388,75
S2 sp	105,22	0,00	20,51	470,83	366,00	962,56	2,63	3,38	0,00	5,43	1,46	377,05	381,89
S2 ss	96,52	0,00	17,95	376,67	309,50	800,64	3,16	1,97	0,00	10,85	0,00	962,30	964,27
S1 sp	20,87	3,89	2,56	41,67	59,50	124,60	0,00	1,69	1,29	0,00	1,04	101,64	105,66
S1 ss	22,61	0,00	3,59	43,33	111,50	181,03	2,11	1,13	5,81	0,00	1,67	206,56	215,16
E sp	56,52	0,00	23,59	76,67	100,50	257,28	1,05	7,04	8,06	0,00	3,13	232,79	251,02
E ss	70,43	0,00	44,87	131,67	167,00	413,97	1,58	19,15	10,32	0,00	4,17	411,48	445,12

Annexe 9 : Unités et teneurs limites des paramètres physico-chimiques et bactériologiques d'une eau de boisson selon les norme ANOR et de l'OMS (2008).

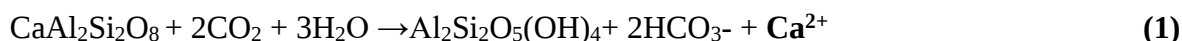
PARAMETRES	UNITES	BVAC	Limite OMS	Limite ANOR
Température	°C	/	25	0
pH	/	4.38-6.35	6.50-9.50	6,5- 9
Conductivité électrique (CE)	µS/cm	7.6-180.2	180-1000	1000
Chlorure (Cl ⁻)	mg/L	1,13-32,11	< 250	200
Silice (SiO ₂)	mg/L	/		50
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/L	0- 38.54	< 250	250
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/L	0-12.13	50	50
Calcium (Ca ²⁺)	mg/L	59.5 - 971	< 500	/
Magnésium (Mg ²⁺)	mg/L	41.67 - 845	< 50	50
Sodium (Na ⁺)	mg/L	20.87 - 225.22	< 200	150
Potassium (K ⁺)	mg/L	2.56 - 148.72	12	12
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/L	101.64 - 1436.07		/
Fer (Fe ²⁺)	mg/L	/	< 0.3	250
Aluminium (Al ³⁺)	mg/L	/	< 0.2	50
Fluorure (F ⁻)	mg/L	0 - 3.68	< 1.5	0,5
Ammonium NH ₄ ⁺)	mg/L	0 - 3.89	< 1.5	0.5
Phosphates (PO ₄ ³⁻)	mg/L	0-10.85	/	1000
Nickel (Ni ²⁺)	mg/L		0.002	0.2
Manganèse (Mn ²⁺)	mg/L		0.5	/
Cuivre (Cu ²⁺)	mg/L		2	/
Zinc (Zn ²⁺)	mg/L		3	/
Coliformes fécaux (CF)	UFC/100 mL	0-150	0	0
Streptocoques fécaux (SF)	UFC/100 mL	0-160	0	0

Annexe 10 : Quelques équations de mise en solution des éléments chimiques majeurs

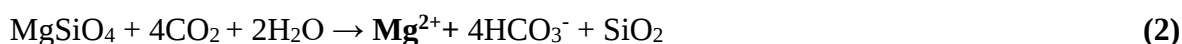
Pendant l'hydrolyse des minéraux primaires, les bicarbonates, les cations majeurs et la silice sont libérés à partir de l'altération des roches et du lessivage des sols d'après l'équation générale suivante :

Minéraux primaires + CO₂ + H₂O → HCO₃⁻ + minéraux secondaire + cations + silice

- **Hydrolyse de l'anorthite en kaolinite :**



- **Hydrolyse de l'olivine :**

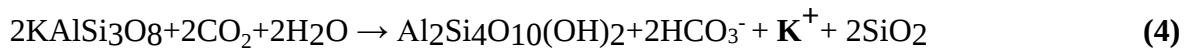


Les éléments alcalins (Na⁺, K⁺) peuvent avoir plusieurs origines. Une partie du sodium serait d'origine atmosphérique (précipitations) et une autre partie proviendrait de l'altération des minéraux primaires suivant l'équation ci-dessous :

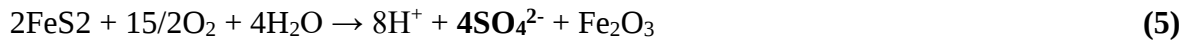
- **Hydrolyse de l'albite en kaolinite**



▪ **Hydrolyse de l'orthose en montmorillonite**



Les sulfates pourraient provenir de la décomposition ou de la dégradation des êtres vivants (végétaux, animaux), des apports atmosphériques et du lessivage des minéraux tels que la pyrite avec mise en solution du fer suivant la relation d'oxydation suivante :



En absence des roches carbonatées, les bicarbonates rencontrés pourraient avoir une origine atmosphérique et souterraine (activités internes de la LVC). Ils se forment à partir des réactions chimiques suivantes :

