

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix – Travail – Patrie

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace – Work – Fatherland

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications

Laboratory of Geosciences for Internal Formations and Applications

**CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE DES
EAUX DU BASSIN VERSANT DU COURS D'EAU SAO
(OUEST CAMEROUN)**

*Mémoire présenté et soutenu 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

Par

NGASSAM Steve Yannick

Matricule : 15B2658

Licencié en Sciences de la Terre



Sous la direction de

Dr. ANABA ONANA Achille Basile

Chargé de Cours

Année académique : 2022-2023

DEDICACE

A mes parents :

- **Mon père TCHABO Lazare**
- **Ma mère TCHAMBA jacqueline**

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage et de bonne volonté pour réaliser ce modeste travail et qu'il m'accompagne toujours durant tout mon cursus Universitaire. Mes sincères s'adresse par la suite :

Au **Dr ANABA ONANA Achille Basile** qui, malgré ces multitudes occupations a usé du peu de temps libre dont il disposait, pour me prodiguer d'importants conseils techniques afférents à mon thème de mémoire ;

Au professeur **NDJIGUI Paul-Désiré** Chef du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour tous ses efforts qu'il met au service des étudiants des Géosciences ;

Au professeur **NDAM NGOUPAYOU** chef de laboratoire de géologie de l'ingénieur et d'altérologie ;

Je remercie également tous mes enseignants du primaire, du secondaire et surtout du supérieur, en particulier ceux du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour leurs efforts constants dans la formation des étudiants. Je pense notamment aux Professeurs : **ZENTI Jean Paul, YONGUE FOUATEU Rose, NKOUMBOU Charles, NJILAH Isaac Konfor, ONANA Vincent Laurent, YENE ATANGANA Joseph Quentin, BISSO Dieudonné, EKOMANE Emile, TCHOUANKOUE Jean Pierre, NGEUTCHOUA Gabriel, NGO BIDJECK Marie Louise, TEMGA Pierre, MBIDA YEM Lionel** et aux Docteurs : **FEUMBA Roger, NGO'O ZE Arnaud , NSANGOU Daouda** ;

A mes aînés académiques **MVELE Leopold, FOLONG TCHOFFO Marlyse Fabiola, NGA ONANA Alix Audrey** m'avoir aidé à améliorer ce travail ;

A mes camarades de promotion **KENGNI KENGMO Derrick, YAMGOUE Daryl, MOUMBAGNAM Abdou Fatahi, MINLANG Aurore, NTEDE ANEGUE Luc Junior, OUM NDJIGUI Petty Camus, YOUSOUF MOUSTAPHA Haroun, ZOUNKANE Oumarou, TOBIT NGNABA Lisa Love, TOKAM FOTSI Franck Leonel** ;

A la famille **MBEU NGASSAM** et particulièrement à mon père **TCHABO Lazare** qui a financé mes études, **FONDJA Marceline, NDJIKE Rosalie, KEUCHOUBEU Alice, NGABA Nicole, NYA TCHAMBA Richard, NZIMBIA Hortense, YANTCHOUNKEU**

Angeline, NYANDA Julienne, NDJIKE TCHABO Michelle, NGAMI Sandrine, TCHOUANFEU Bibiche Gaele, NJAMI Christelle, TCHAKOUNTE Joceline, WANDJA Lary, YEPGANG SEUGNOU Stallone, NYANDA Vitale qui m'ont soutenue tout au long de mon travail ;

Aux familles **MBEU NYA, MA'A NVEUM NZOUABET** et **MAGNIE NDJIKE**

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et dont je n'ai pas pu citer, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	vii
LISTES DE FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
RESUME.....	x
I.1. CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	5
I.1.1. Situation géographique et administrative.....	5
I.1.2. Climat	5
I.1.2.1. Précipitations.....	6
I.1.2.2. Températures.....	6
I.1.2.3. Courbe ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)	6
I.1.3. Végétation.....	7
I.1.4. Géomorphologie	7
I.1.4.1. Relief.....	7
I.1.4.2. Hydrographie	8
I.1.5. Géologie de la zone d'étude	8
I.1.5.1. Substratum	8
I.1.5.2. Sols.....	9
I.1.5.3. Hydrogéologie.....	9
I.2. CADRE HUMAIN	10
I.2.1. Population.....	10
I.2.2. Activités socio-économiques	10
I.3. Travaux antérieurs.....	10
II.1. Critères de choix de la zone d'étude	13

II.2. Méthodologie de travail	13
II.2.1. Recherches bibliographiques et documentaires	13
II.2.2. Travaux de terrain.....	13
II.2.2.1. Matériel utilisé	13
II.2.2.2. Choix et descriptions des points de prélèvements.....	14
II.2.2.3. Mesure des paramètres physiques in situ.....	16
II.2.2.4. Prélèvement des échantillons d’eaux	16
II.2.3. Travaux de laboratoire	17
II.2.3.1. Caractérisation physiographique du bassin versant de Sao.....	17
II.2.3.2. Bilan hydrologique.....	18
II.2.3.3. Traitement et conditionnement des échantillons au laboratoire	19
II.2.3.4. Analyse des paramètres chimiques	20
II.2.3.4.1. Méthodes.....	20
II.2.3.4.2. Principes des différentes méthodes	20
II.2.3.4. Calcul de la balance ionique	21
II.2.3.5. Traitement des données	21
II.2.3.5.2. Méthode statistique	22
III.1. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DU SAO	24
III.1.1. Caractéristiques géométrique et morphométrique.....	24
III.1.2. Caractéristiques hydrographiques.....	26
III.2. BILAN HYDROLOGIQUE.....	28
III.3. VARIATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DU SAO	30
III.3.1. Paramètres physiques (pH, conductivité et TDS).....	30
III.3.2. Paramètres chimiques.....	31
III.3.2.1. Cations majeurs et somme des équivalents cations	31
III.3.2.2. Anions majeurs et sommes des équivalents anions	32

III.3.2.3. Autres éléments	33
III.3.2.4. Balance ionique	34
III.3.2.5. Facies hydrogéochimiques.....	34
III.4. Origines des éléments dans les eaux du bassin versant du Sao.....	35
III.4.1. Matrice de Corrélation (MC).....	35
III.4.2. Analyse en composante principale (ACP).....	36
III.5. Vulnérabilité des eaux du bassin versant du Sao	38
III.6. Facteurs environnementaux contrôlant la qualité des eaux du bassin versant du Sao	38
III.6.1. Nature Lithologique et âge de la roche.....	38
III.6.2. Types de Sols.....	38
III.6.3. Relief.....	39
III.6.4. Végétation	39
III.6.5. Climat	39
III.6.6. Anthropisation	39
III.7. Principaux usages des eaux du bassin versant du Sao	39
III.7.1. Usage domestique.....	39
III.7.2. Aptitude des eaux à l'irrigation et à l'agriculture.....	41
III.7.2.1. Classification des eaux par le digramme Riverside ou Richard 1954	41
III.7.2.2. Classification des eaux par le digramme de Wilcox (1955).....	42
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	44

LISTE DES ABBREVIATIONS

ACP : Analyse en Composante Principale

BI : Balance Ionique

BVS : Bassin versant du Sao

ETP : Evapotranspiration Potentielle

ETR : Evapotranspiration Réelle

COND : Conductivité

Ia : Indice d'aridité

IQE : Indice de Qualité des Eaux

IRGM : Institut de Recherche Géologique et Minière

GPS : Global Positionning System

MC : Matrice de Corrélation

méq/l : Milli équivalent par litre

mg/l : Milligramme par litre

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PCD : Programme de Développement Communautaire

P : Précipitation

pH : Potentiel d'hydrogène

T : Température

TDS : Total Dissolved Solution

TZ⁺ : Somme des équivalents cations

TZ⁻ : Somme des équivalents anions

UYI : Université de Yaoundé I

μS/cm : Micro siemens par centimètre

R_i : Reserve en eau du mois précédent

ΔRUF : Reserve en eau Facilement Utilisable

LISTES DE FIGURES

Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude	5
Figure 2: Diagramme ombrothermique pour la période allant de 1951 à 2021.....	6
Figure 3: Orographie du bassin versant du sao.....	7
Figure 4: Hydrographie du bassin versant du Sao (extrait de la carte topo de Yaoundé au 1/50000).....	8
Figure 5 : carte géologique de la zone d'étude (Fitton, 1987 ; Wotchoko et al., 2015 ; Primus et al., 2020). A) zone d'étude dans la ligne Volcanique du Cameroun. B) la carte géologique du bassin versant de Sao.....	9
Figure 6: a) un multi paramètre YSI ; b) bouteilles plastique, GPS gramin, marqueur, stylo, cahier de terrain et ruban adhésif ; c) mesure in situ des paramètres physiques	14
Figure 7: carte d'échantillonnage des eaux du bassin versant du Sao.....	15
Figure 8: organigramme de Thornthwaite pour le calcul du bilan hydrique	19
Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin versant du Sao.....	25
Figure 10 : morphologie du bassin versant du Sao.....	26
Figure 11: ordre du réseau hydrographique.....	27
Figure 12: période de recharge et de vidange des nappes libre du bassin versant du Sao.....	29
Figure 13 : Niveaux de concentration des paramètres physiques.....	31
Figure 14: Niveau de variation des cations majeurs et TZ^+ ($\mu\text{eq/l}$) dans les eaux du bassin versant du Sao.....	32
Figure 15: variation des anions majeurs et TZ^- ($\mu\text{eq/l}$) dans les eaux du bassin versant du Sao	33
Figure 16 : variations des autres éléments dans les eaux du bassin versant du Sao.....	33
Figure 17: diagramme de Piper des eaux du bassin du Sao.....	35
Figure 18: Analyse en composante principale des paramètres physico-chimiques du bassin versant du Sao.....	37
Figure 19: Diagramme de Riverside du BVS.....	42
Figure 20: Diagramme de Wilcox du BVS	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Précipitations, températures moyenne mensuelle du bassin versant du Sao (1951 à 2021)	6
Tableau 2 : Coordonnées des points d'échantillonnage	14
Tableau 3. Formules appliquées pour le calcul des paramètres morphométriques du bassin versant du Sao.....	17
Tableau 4. Éléments caractéristiques du relief du bassin versant du Sao.....	24
Tableau 5. Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du bassin du Sao	25
Tableau 6. Caractérisation métrique du réseau hydrographique.....	27
Tableau 7: paramètres hydrographique du bassin versant du Sao.....	27
Tableau 8: Valeurs de l'ETP selon THORNWAITE dans le bassin versant du Sao.....	29
Tableau 9: Paramètres du bilan hydrologique du bassin versant du Sao	29
Tableau 10: paramètres analytiques du bilan hydrique vérifiant la relation $P = E + R + I$	29
Tableau 11. Niveau de variation des paramètres physiques des eaux du BV du Sao	31
Tableau 12: Niveaux de variation des paramètres chimiques en mg/l (milligramme par litre) dans quelques eaux souterraines et d'écoulement du bassin versant du Ndé	34
Tableau 13: Niveaux de variation des paramètres chimiques $\mu\text{eq/l}$ (micro-équivalent par litre) dans quelques eaux souterraines et d'écoulement du bassin versant du Sao.	34
Tableau 14. Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux du BVS	36
Tableau 15. Poids relatif des paramètres physico-chimique et norme de l'OMS de la qualité des eaux	40
Tableau 16 : Valeur de l'indice IQE et classe de qualité des eaux du bassin versant du Sao	41

RESUME

Situé dans le département du Ndé (Ouest-Cameroun), le bassin versant du Sao s'étend entre les latitudes 5°7'00''N et 5°10'00''N et les longitudes 10°28'30''E et 10°31'30''E. Il fait partie intégrante du bassin du Ngam.

Pour évaluer la qualité de l'eau dans ce bassin, la méthodologie utilisée porte sur la recherche bibliographique, les travaux de terrain (identification et choix des ouvrages hydrauliques les plus utilisés, prélèvements d'échantillons d'eau, mesures des paramètres physiques) et les travaux de laboratoire (dosage des cations et anions majeurs, traitement des données). Ces travaux ont abouti aux principaux résultats suivants :

Sur le plan physique, le bassin versant du Sao couvre une superficie de 24,35 km² pour un périmètre de 26,88 km. Le bilan hydrologique réalisé durant la période allant 1951 à 2021 révèle à partir d'une précipitation moyenne interannuelle de 1317 mm, une évapotranspiration de l'ordre de 780,67 mm, un ruissellement de 375,34 mm et une infiltration de 160,99 mm.

Du point de vue physico-chimique, les eaux du bassin versant du Sao sont acide à basique ($5,75 \leq \text{pH} \leq 8,85$). L'acidité de ces eaux serait liée non seulement au type de sols traversé dans la région mais aussi à la présence des acides provenant de la décomposition de la matière organique tandis que la tendance basique pourrait s'expliquer par le rejet dans ces eaux des produits chargés en ions OH⁻ provenant des eaux savonneuses et des détergents issus des lessives, du nettoyage des véhicules et de la vaisselle. Ces eaux présentent des conductivités électriques qui varient 12,2 et 225,5 µS/cm traduisant leur caractère faiblement minéralisé à peu accentué. Les faciès chimiques des eaux du BVS sont dominées par les faciès de type chloruré magnésique (52%), chloruré sodique (36%) et chloruré calcique (12%). Les sources de minéralisation des eaux du BVS sont généralement de trois types : hydrolyse des minéraux silicatés et activité volcanique (pour les ions K⁺, Ca²⁺, Na⁺, NH₄⁺, Mg²⁺ et le SO₄²⁻), origine anthropique (pour les ions NO₃⁻ et Cl⁻) et d'origine mixte (géogénique, atmosphérique, biogénique et anthropique). Le faible pouvoir alcalinisant (SAR) permet d'utiliser les eaux de la zone en irrigation pour tout type de culture. Le développement de l'agriculture, la poussée démographique et le lessivage des sols accroissent la détérioration de la qualité des eaux de surfaces et souterraines.

Mots clés : hydrogéochimie, eau, Bassin versant du Sao, ouest, Cameroun.

ABSTRACT

Located in the Ndé department (West Cameroon), the Sao watershed extends between latitudes 5°7'00"N and 5°10'00"N and longitudes 10°28'30" E and 10°31'30"E. It is an integral part of the Ngam basin.

To assess the water quality in this basin, the methodology used involves bibliographic research, field work (identification and choice of the most used hydraulic structures, taking water samples, measuring physical parameters) and laboratory work (dosing of major cations and anions, data processing). This work led to the following main results: From a physicochemical point of view, the waters of the Sao watershed are acidic to basic ($5.75 \leq \text{pH} \leq 8.85$). The acidity of these waters would be linked not only to the type of soil crossed in the region but also to the presence of acids coming from the decomposition of organic matter while the basic tendency could be explained by the rejection of products in these waters loaded with OH^- ions from soapy water and detergents from laundry, cleaning vehicles and dishes. These waters have electrical conductivities which vary from 12.2 to 225.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflecting their weakly to slightly accentuated mineralized character. The chemical facies of the BVS waters are dominated by magnesium chloride (52 %), sodium chloride (36 %) and calcium chloride (12 %) types. The sources of mineralization of BVS waters are generally of three types: hydrolysis of silicate minerals and volcanic activity (for K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} and SO_4^{2-} ions), anthropogenic origin (for NO_3^- and Cl^- ions) and of mixed origin (geogenic, atmospheric, biogenic and anthropogenic). The low alkalizing power (SAR) allows the waters of the area to be used for irrigation for all types of crops. The development of agriculture, population growth and soil leaching increase the deterioration of the quality of surface and groundwater.

Key words: hydrogeochemistry, water, Sao watershed, west, Cameroon.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource vitale pour des besoins d'alimentation, agricole et d'électrification. La gestion de cette ressource naturelle pose un réel problème pour les populations du monde car elle est souvent sujette à des dégradations diverses. Gérer cette ressource consiste à la maîtriser tant qualitativement que quantitativement. Du point de vue qualitatif, la composition minéralogique d'une eau dépend du milieu où elle se trouve (sol, sous-sol ou atmosphère). Les éléments qui se mélangent à cette ressource lui confèrent un chimisme particulier traduisant certaines propriétés ou spécificités intrinsèques à son trajet (Xiao et al 2012). En traversant les formations géologiques, l'eau est susceptible de présenter une augmentation de sa minéralisation par lessivage des roches. Cette situation peut donner lieu à des atteintes graves à la qualité de l'eau par contamination verticale due aux activités anthropogéniques (Yassir et Amira., 2013 ; Omar *et al* 2014 ; Ntep *et al.*, 2014). Cette minéralisation qui peut être influencée par l'activité anthropique peut parfois dégrader cette ressource.

Au Cameroun de nombreuses sources de minéralisation des eaux ont été mises à jour dans la partie ouest du pays, notamment les travaux réalisées par Nono *et al.*, (2009) dans les eaux souterraines des hauts plateaux de l'Ouest- Cameroun ; Mfonka (2015) dans le bassin versant du Nchi ; Njinwoua (2015) dans les eaux du Noun à Bayomen ; Ndjikeu (2015) dans les eaux du bassin versant du Ndé ; Santsa *et al.*, (2019) ; dans le bassin versant de la Menoua Moucherou *et al.*, (2019) dans les aquifères de la plaine du Noun. Ces auteurs, ont mis en évidence une dégradation de cette ressource due par la plupart du temps à l'action anthropique. Par ailleurs, le réseau d'adduction en eau potable ne couvrant pas toute la zone d'étude, les populations ont plus recours aux eaux de sources, puits et cours d'eau pour leurs besoins. De plus l'on note dans la zone une intense activité agricole avec notamment l'usage des engrais divers. Dès lors, il est primordial de maîtriser cette ressource d'où l'intérêt de cette étude qui vise à déterminer la signature physico-chimique des eaux du site d'étude afin de détecter des éventuelles dégradations. L'atteinte de cet objectif passe par les objectifs spécifiques suivants :

- déterminer les paramètres morphométriques du bassin versant du Sao ;
- évaluer les paramètres physico-chimique des eaux du bassin versant du Sao ;
- établir les principales origines des paramètres physico-chimiques dans ces eaux ;
- rechercher d'éventuelles dégradations dans ces eaux.

Ce travail s'organise en trois chapitres encadrés par une introduction et conclusion générale et des perspectives:

- le premier chapitre est axé sur les généralités de la zone d'étude et les travaux antérieurs ;
- le deuxième chapitre présente les matériels et les méthodes utilisés pour l'obtention des résultats ;
- Le troisième chapitre enfin présente, discute et interprète les différents résultats obtenus.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'environnement naturel de la zone d'étude, à savoir le bassin versant du Sao. Il est question ici de ressortir dans un premier temps le cadre physique de la zone et dans un second temps le cadre humain.

I.1. CADRE PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1. Situation géographique et administrative

Le bassin versant du Sao fait partie du bassin versant du Noun ; administrativement il dépend de l'arrondissement de Bangangté, dans le département du Nde. Il se situe entre 5°7' et 5°10' de latitude nord et entre 10°28'30'' et 10°31'30'' de longitude est. Il est limité au nord par le bassin de Pantse et au sud par le bassin du Ndanda.

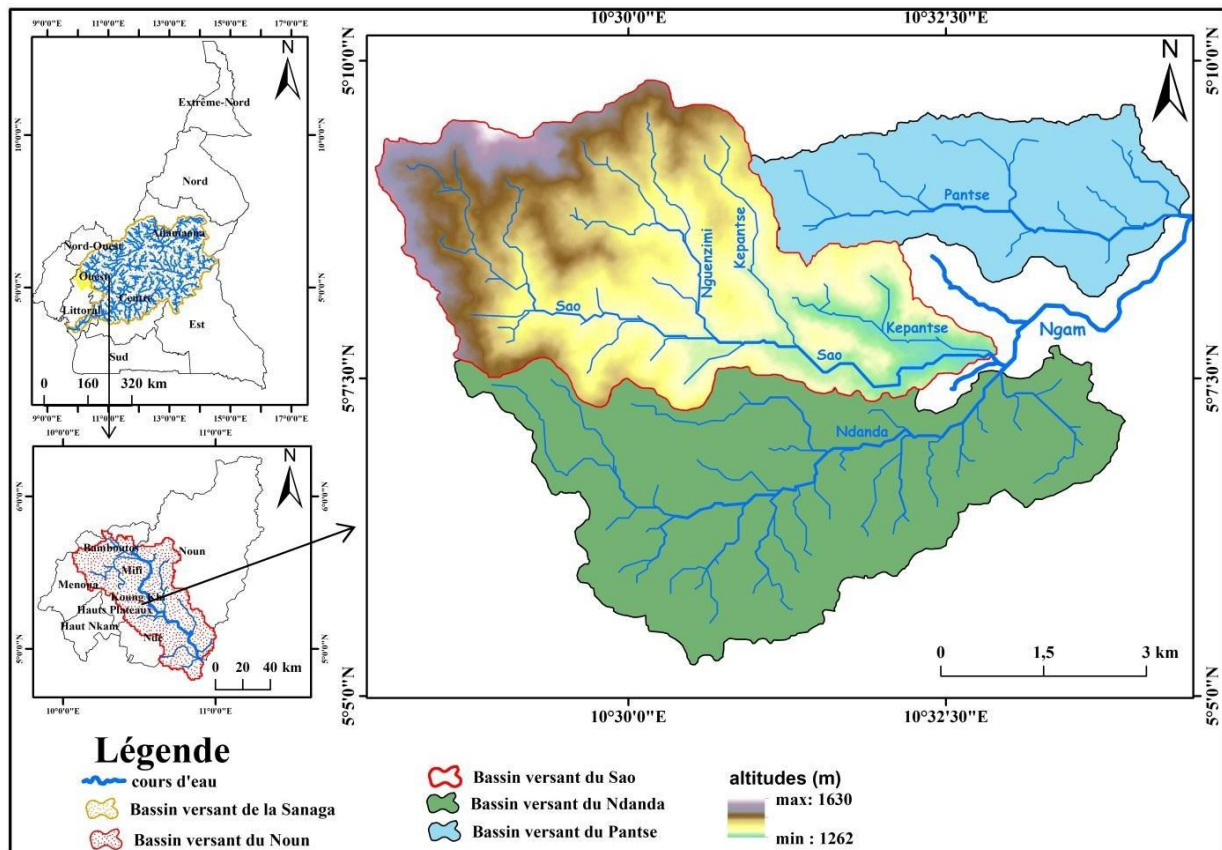


Figure 1 : carte de localisation de la zone d'étude

I.1.2. Climat

Le Bassin versant du Sao appartient à un climat de mousson de type sub-montagnard (Suchel 1972). Selon Tsalefac (1983) le régime climatique de la zone est humide à caractère subéquatorial, avec une saison sèche qui s'étale sur 03 mois (décembre à février) et une saison de pluvieuse sur 09 mois (mars à novembre).

I.1.2.1. Précipitations

La pluviométrie moyenne annuelle calculée sur une période allant de 1951 à 2021 est de 1316,9 mm. La répartition des pluies présente le mois de septembre comme le mois le plus pluvieux (249,2 mm) et janvier le moins pluvieux (2,2 mm) (Tableau 1).

I.1.2.2. Températures

Durant la période d'étude la température moyenne annuelle est de 20,6°C. Les variations au cours de l'année sont faibles, puis que le mois de mars est le mois le plus chaud avec 22°C tandis que le mois de juillet est le moins chaud avec 19,6° de température (Tableau 1).

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

Cette courbe est obtenue à partir des données pluviométriques et thermiques d'une région donnée pendant une période bien définie. Elle permet de distinguer les mois écologiquement secs des mois écologiquement humides. Un mois sera dit sec si la courbe de température se situe au-dessus de la courbe des précipitations ($P=2T$) (Figure 2).

Tableau 1 : Précipitations, températures moyenne mensuelle du bassin versant du Sao (1951 à 2021)

	Jan	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
P(mm)	2,2	22,5	74,1	116,4	123,9	129,8	117,6	156,3	249,2	230,1	91,1	3,8
T (°C)	21,4	21,8	22	21,5	20,7	20	19,6	19,7	19,7	19,8	20,5	20,7

P : précipitations T : températures

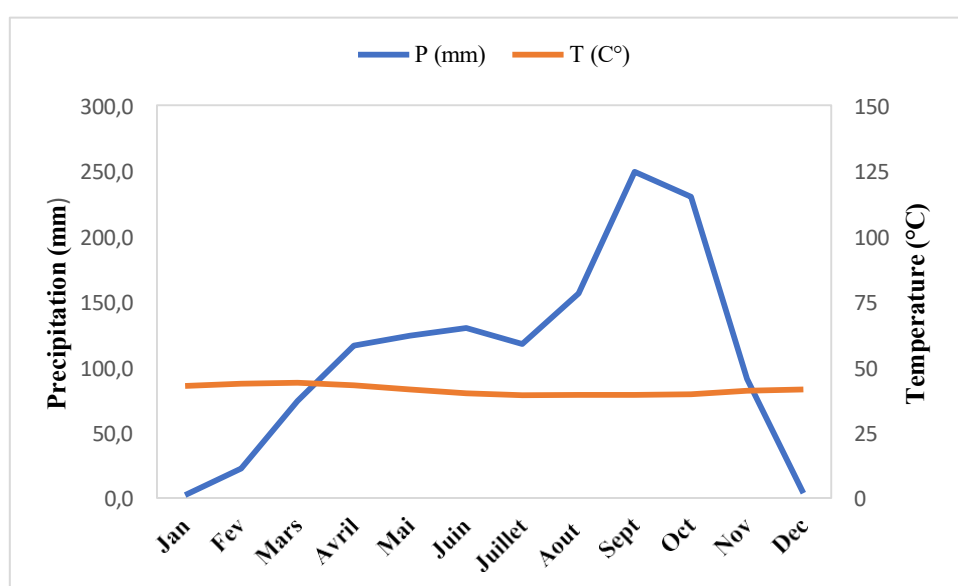


Figure 2 : Diagramme ombrothermique pour la période allant de 1951 à 2021

I.1.3. Végétation

La végétation du Bassin versant du Sao est marquée par les cultures vivrières, les forêts (Eucalyptus et sommets de pin...), les plantes fruitières et la savane. Cette végétation est dominée par une savane post-forestière et est composée d'arbustives à *Daniellia oliveri* et *Lophira lanceolata* (Njoukam *et al.*, 2008).

I.1.4. Géomorphologie

I.1.4.1. Relief

Le relief varie de part et d'autre du bassin versant avec une altitude moyenne de 1432 m au-dessus de la mer. Ce bassin est une partie du plateau Bamiléké d'altitude moyenne 1400m à 1600m (Morin 1988). L'on rencontre trois unités morphologiques :

- une unité morphologique d'altitudes comprise entre 1267 m et 1388 m composée d'une succession de collines avec des dépressions occupées par des cours d'eaux ;
- une unité morphologique d'altitudes comprissent entre 1388 m et 1509m ;
- une unité morphologique d'altitudes comprissent entre 1509 m et 1630 m correspondant aux sommets du plateau.

Le modèle typique du bassin versant est une alternance de collines au fur et à mesure qu'on évolue vers l'ouest (Figure 3).

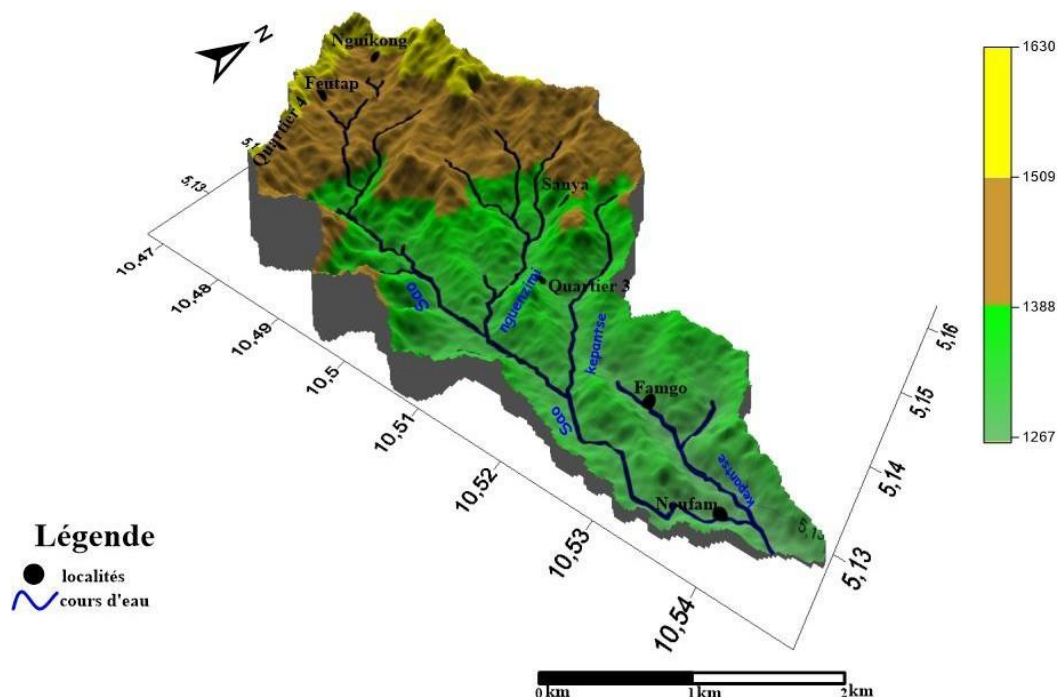


Figure 3: Orographie du bassin versant du sao

I.1.4.2. Hydrographie

Le bassin versant du Sao fait partie du bassin hydrographique de la Sanaga. Son cours principal, le Sao, est d'ordre 3 et se jette dans le Ngam. Il prend sa source sur les collines des villages feutap et nguikong. D'une longueur 10,15 Km, il s'écoule suivant la direction WNW – ESE. Ses principaux affluents sont le Nguenzimi et le Kepantse (Figure 4).

I.1.5. Géologie de la zone d'étude

I.1.5.1. Substratum

Le substratum de la zone d'étude est essentiellement basaltique et fait partie du complexe plutonique et volcanique de la ligne du Cameroun (Figure 5). Ces basaltes sont déposés en bloc et massif, des morceaux de roche sont gris foncé à noir avec des minéraux à grains fins (Wotchoko *et al.*, 2015). Ces basaltes présentent des textures porphyriques et contiennent des phénocristaux d'Olivine, de clinopyroxènes, de plagioclases et de minéraux opaques (Tchouankoue *et al.*, 2012 ; Wotchoko *et al.*, 2015). Sur le plan structural, les travaux de Simeni (2017) ont montré que les dykes basaltiques de la ligne du Cameroun sont associés à des fractures orientées NE-SW et E-W avec des pendages sub-verticaux.

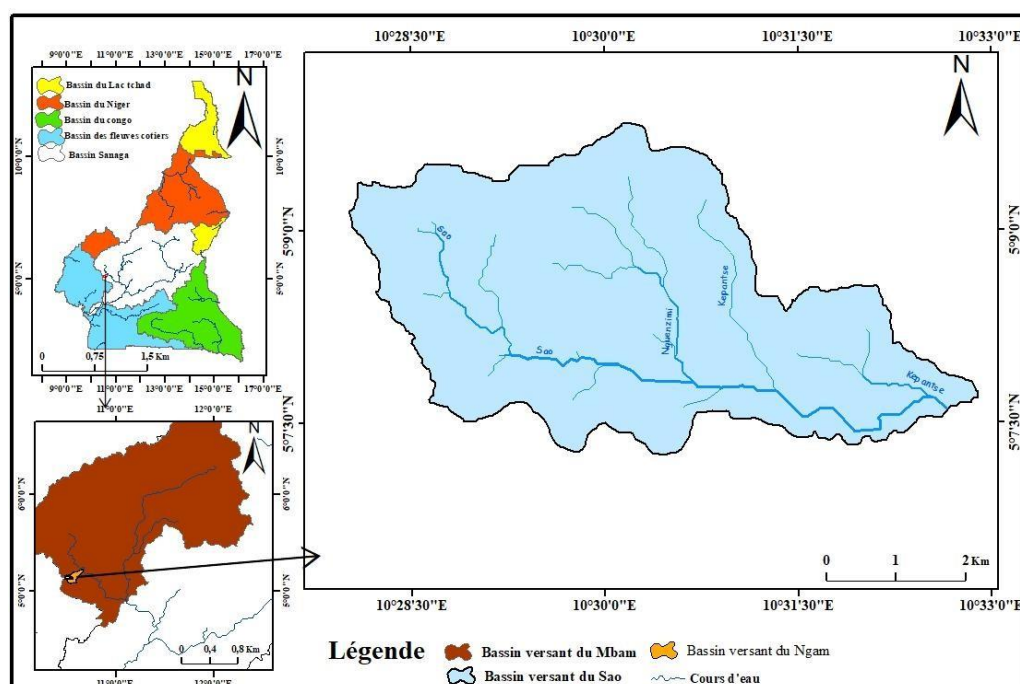


Figure 4 : Hydrographie du bassin versant du Sao (extrait de la carte topo de Yaoundé au 1/50000)

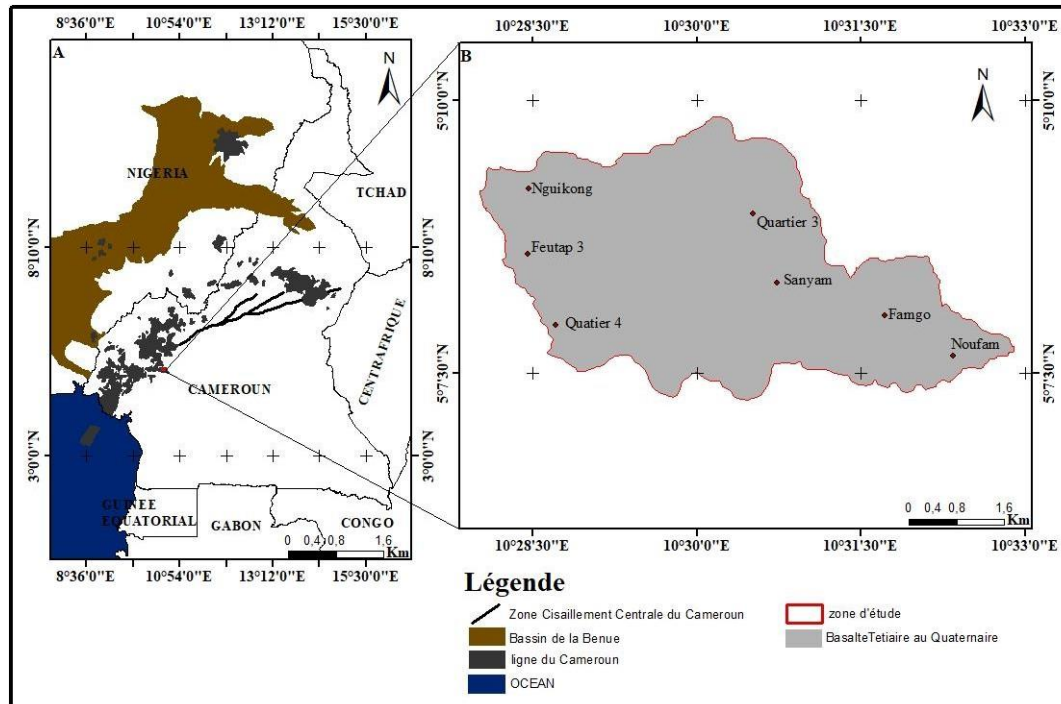


Figure 5 : carte géologique de la zone d'étude (Fitton, 1987 ; Wotchoko *et al.*, 2015 ; Primus *et al.*, 2020). A) zone d'étude dans la ligne Volcanique du Cameroun. B) la carte géologique du bassin versant de Sao

I.1.5.2. Sols

La couverture pédologique développée dans le bassin versant étudié est constituée des sols ferralitiques et des sols hydromorphes :

- les sols ferralitiques qui se sont développés sur du basalte sont humifères et contiennent des quantités notables d'hydroxydes d'alumine (Segalen 1962). Ces sols ont une coloration rouge et une texture argileuse avec des pH variant entre 4,7 et 5,6 en surface et entre 5,5 et 6,5 en profondeur (Njonfang *et al.*, 2007). Selon Martin (1959) ces sols ont une morphologie qui se présente de la manière suivante : un horizon humifère d'épaisseur et d'intensité variable (10 à 20 cm, brun rouge foncé à brun gris foncé) argileux, à structure le plus souvent nuciforme à polyédrique fine et un grand horizon rouge sans différenciation sur 3 à 5m, argileux à structure fondue.
- les sols hydromorphes se rencontrent dans les plaines et le long des cours d'eaux. Cependant, le drainage est mauvais à cause de l'imperméabilité de ces sols qui maintiennent la nappe phréatique toujours à fleur de surface (10 à 50cm au maximum).

I.1.5.3. Hydrogéologie

Le bassin versant du Sao est constitué des aquifères de socle :

- l'aquifère d'altérité à nappe libre qui est le premier aquifère rencontré sous la surface du sol. L'eau y circule à travers les pores du sol. Cette nappe se renouvelle rapidement car la profondeur de son toit oscille entre 1 et 35m environ. Ces aquifères sont exploités par les populations du bassin à travers les puits ;
- les aquifères à nappes captives sont plus profonds et limités par deux formations géologiques imperméables. Les porosités secondaires de ces aquifères se sont mis en place suite à des mouvements tectoniques et des phénomènes d'altérations. Ces aquifères volcaniques ont une productivité élevée avec des débits Q compris entre $4,5 \leq Q \leq 10,5m^3$ (Feumba *et al.*, 2021).

I.2. CADRE HUMAIN

I.2.1. Population

Le bassin versant du Sao traverse une partie de la ville de Bangangté, les villages Famgo, Feutap, Noufam. Cette population est majoritairement composée de femmes PCD (2015). Elle est extrêmement jeune et constituée en majorité des peuples autochtones d'autres groupes ethniques venant des autres régions du pays.

I.2.2. Activités socio-économiques

L'économie de la zone est basée sur deux secteurs d'activités : le secteur primaire et le secteur secondaire. L'économie est centrée sur les activités agricoles et occupe les 31,1% de la population (Nya, 2020). Les hommes pratiquent essentiellement les cultures de rente telles que le cacao le café tandis que les femmes et les jeunes sont plus focalisés sur les cultures vivrières (maïs et haricots). L'élevage est associé à l'agriculture car les déchets issus de l'élevage sont utilisés comme fertilisants par la population du bassin. L'élevage du gros bétail est peu appliqué par les autochtones et essentiellement pratiqué par les allogènes.

I.3. Travaux antérieurs

La plupart de travaux effectué en hydrogéochimie au Cameroun ont montré que la composition chimique d'une eau dépend de la nature lithologique du substratum rocheux et de l'anthropisation de la zone drainé par cette eau (Mouncherou *et al.*, 2011 ; Mfonka *et al.*, 2011 ; Kemayou *et al.*, 2012 ; Njikeu, 2015). Ainsi quelques études réalisées sur le Nkoup, le Mou, le Panké (Tita, 2008 ; Tsinkoue, 2012 ; Mbouobda, 2014) ont montré que la minéralisation est plus élevée en milieu volcanique avec $TZ^+ \geq 724 \mu eq/l$ et $TZ^+ \geq 2677$ et très élevée sur les lahars (Benedetti, 2003).

Les travaux de Ntep (2005), Kuitcha *et al.*, (2013), Tabué *et al.*, (2013), Kouam Kenmogne (2013), Naah (2013), Ntep *et al.*, (2014) Mangoua (2021) Bon *et al.*, (2021)

révèlent que la qualité des eaux de la ville de Yaoundé est liée à divers types de pollution (physique, chimique et bactériologique). Le calcul de l'IQE par Youwah (2021) et Tatou et al (2023) révèlent la plupart des eaux des villes de Yaoundé et Douala sont de mauvaise qualité. La plupart des travaux en hydrogéochimie au Cameroun ont été effectués dans des grands bassins versants camerounais, pour l'instant aucune étude de genre a déjà été faite dans le bassin versant du Sao, d'où l'intérêt de ce travail de caractérisation hydrogéochimique des eaux de ce bassin.

Conclusion

Dans ce chapitre il était question de présenter le milieu naturel dans lequel l'étude a été réalisée. Il en ressort que le bassin versant du Sao couvre les villages Feutap, Fango-neta qui font partie de l'arrondissement de Bangangté l'une des quatre communes que compte le département du Ndé et est principalement drainé par le cours d'eau Ngam qui est un sous bassin du bassin versant du Noun. La végétation secondaire qui domine dans la zone s'est développée sur des sols ferralitiques et hydromorphes développés sur un substratum volcanique (Basalte à intercalation trachytique). Cette zone est peuplée en majorité par les peuples autochtones avec l'agriculture comme activité principale.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

L'objectif de ce chapitre est la présentation du matériel utilisé et la méthodologie mise en œuvre pour mener à bien cette étude.

II.1. Critères de choix de la zone d'étude

Les principaux critères qui ont guidé le choix de ce site sont entre autre la difficulté d'accès à l'eau potable pour la consommation, la forte densité des populations au niveau des points d'eaux (sources, puits et rivières), le manque des systèmes d'assainissements efficaces et les activités agricoles intenses dans le dit bassin

II.2. Méthodologie de travail

II.2.1. Recherches bibliographiques et documentaires

Cette recherche a consisté à la synthèse des travaux antérieurs déjà réalisés dans la zone d'étude et ses environs et ceux réalisés dans d'autres sites ayant le même contexte géologique et morphologique. Cette démarche a mené aux bibliothèques de l'Université de Yaoundé I, de l'institut des recherches géologiques et minières ainsi qu'à des sites internet.

II.2.2. Travaux de terrain

II.2.2.1. Matériel utilisé

Plusieurs outils ont été utilisés sur le terrain :

- une carte topographique de la zone à l'échelle de 1/50000 (Bafoussam 2a NB-32-XI) ;
- un récepteur GPS de marque Garmin pour la prise des coordonnées géographiques des différents points d'échantillonnages (Figure 6) ;
- un multi paramètre YSI pour la prise des paramètres physiques des eaux in-situ (Figure 6) ;
- 25 bouteilles en polyéthylènes nettoyées de 0,5 litre pour le conditionnement des échantillons recueillis ;
- un ruban adhésif
- un carnet de terrain, un stylo à bille, un crayon et un marqueur pour la prise de note, l'étiquetage et la codification des échantillons
- un smartphone pour la prise des photos
- un sac pour transporter les échantillons
- machette et seau



Figure 6: a) un multi paramètre YSI ; b) bouteilles plastique, GPS gramin, marqueur, stylo, cahier de terrain et ruban adhésif ; c) mesure in situ des paramètres physiques

II.2.2.2. Choix et descriptions des points de prélèvements

Compte tenu de la présence de plusieurs ouvrages hydrauliques dans la zone d'étude, les sites à échantillonner ont été sélectionnés suivant les critères ci-dessous :

- l'accès facile à l'ouvrage ;
- l'accord des propriétaires ;
- la sollicitation de l'ouvrage par les consommateurs ;
- la disposition spatiale de l'ouvrage hydraulique dans le bassin versant.

Ainsi neuf (09) points du cours d'eau, treize (13) puits, un (01) forage et deux (02) sources ont été retenus. Les coordonnées géographiques de ces points de prélèvements sont obtenues grâce à un récepteur GPS de marque Garmin (Tableau 1) et sont ploté sur la carte topographique du bassin versant du Sao (Figure 7).

Tableau 2 : Coordonnées des points d'échantillonnage

Points de prélèvement	Types d'ouvrages	Latitudes	Longitudes	Altitudes (m)
ECH-R1	Rivière	5°8'1.73''N	10°31'11.53E	1295.70
ECH-R2	Rivière	5°8'58.14''N	10°30'49.81''E	1348.43
ECH-S	Source	5°9'24.14''N	10°30'41.1''E	1413.36
ECH-P1	Puits	5°9'24.11''N	10°30'41.36''E	1326.18
ECH-P2	Puits	5°8'12.03''N	10°31.7'95''E	1313.99
ECH-P3	Puits	5°8'11.65N	10°31'4.02''E	1310.33
ECH-P4	Puits	5°8'2.5''N	10°31'31.69''E	1280.76

ECH-R3	Rivière	5°8'1.82''N	10°31'30.59''E	1279.55
ECH-P5	Puits	5°8'2.03''N	10°31'35.3''E	1274.97
ECH-P6	Puits	5°7'58.29''N	10°31'34.35''E	1285.64
ECH-P7	Puits	5°7'52.98''N	10°31'52.19''E	1279.55
ECH-P8	Puits	5°7'55.46''N	10°31'47.98''E	1280.76
ECH-P9	Puits	5°7.45'37''N	10°32'29.13''E	1279.85
ECH-R4	Rivière	5°7'57.5''N	10°31'53.53''E	1272.54
ECH-P10	Puits	5°7'57.5''N	10°31'53.53''E	1276.80
ECH-R5	Rivière	5°7'46,5''N	10°31,07'2''E	1301
ECH-R6	Rivière	5°8'41,3''N	10°30'28,4''E	1324
ECH-P11	Puits	5°9'03,9''N	10°30'29,8''N	1391
ECH-S2	Source	5°8'59,7''N	10°30'28''N	1365
ECH-R7	Rivière	5°8'58,3''N	10°30'15,4''N	1349
ECH-R8	Rivière	5°8'56,9''N	10°30'7,5''E	1372
ECH-P12	Puits	5°9'32''N	10°29'41,1''E	1513
ECH-P13	Puits	5°8'15,5''N	10°28'34''E	1512
ECH-R9	Rivière	5°8'11,8''N	10°28'59,4''E	1414
ECH-F	Forage	5°7'59,1''N	10°31'01''E	1334

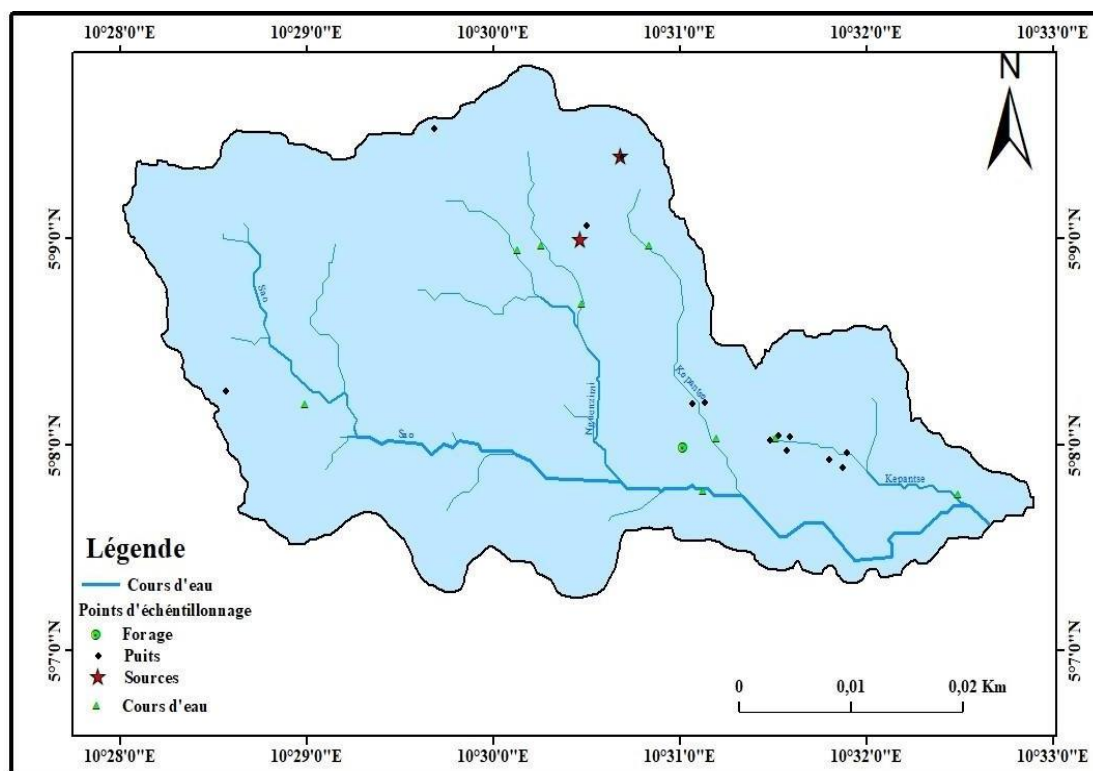


Figure 7: carte d'échantillonnage des eaux du bassin versant du Sao

II.2.2.3. Mesure des paramètres physiques in situ

Les paramètres physiques des eaux tels que : la température, la conductivité électrique (CE), le pH, la salinité, les TDS ont été obtenus in-situ dans les puits, les sources et les cours d'eau grâce à un multi paramètre de marque YSI. La sonde est introduite directement dans l'échantillon d'eau contenu dans un seau en plastique de dix litres rempli dans le cas des puits et du forage. Pour ce qui est du cours d'eau, elle est directement introduite dans celui-ci. Les paramètres physico-chimiques sont directement lus sur l'écran et relevés. La sonde est conservée à l'aide d'une solution de KCl dans un boîtier lors du déplacement d'un lieu à un autre

II.2.2.4. Prélèvement des échantillons d'eaux

La campagne d'échantillonnage a été effectuée en saison sèche, en mars de l'année hydrologique 2022. Le prélèvement des échantillons d'eaux est un exercice très sensible qui nécessite de grands soins compte tenu de l'impact direct qu'il peut avoir sur les résultats et sur l'interprétation. Selon Rodier (2009), l'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physicochimiques de l'eau (gaz dissous, matière en suspension...etc.).

Pour ce qui est du cours d'eau, le protocole d'échantillonnage adopté pour les prélèvements est celui de la technique sur une verticale effectuée dans les eaux fluviales du réseau hydrographique du Nyong et de la Sanaga au Cameroun (Liéno, 2007 ; Kpoumié, 2015 ; Ndam Ngoupayou *et al.*, 2016). Il s'agit des prélèvements sur la même verticale et en sub-surface, à une profondeur inférieure à 1 m au centre de la rivière, préférentiellement où la vitesse d'écoulement est la plus grande, permettant ainsi une bonne homogénéisation des particules solides et des matériaux dissous (Rakotondrabe *et al.*, 2017). Ces prélèvements ont été effectués par des bouteilles en polyéthylène ayant été au préalable rincées à l'eau distillée puis rincées à plusieurs reprises à l'eau d'échantillonnage ensuite remplies jusqu'au bord conformément aux procédures standard (Rodier, 2009 ; Ndam Ngoupayou *et al.*, 2016). Le prélèvement s'est fait par immersion directe à une certaine profondeur dans les cours d'eau peu profonds (Ndam Ngoupayou, 1997).

En ce qui concerne les échantillons d'eaux souterraines (puits, sources et forages), ils ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène préalablement nettoyées à l'eau distillée et rincées trois fois à l'eau d'échantillonnage. Le prélèvement est réalisé par pompage manuel dans le cas du forage ; par immersion directe de la bouteille en ce qui concerne la source et dans un seau de dix litres préalablement bien rincé plusieurs fois à l'eau d'échantillonnage dans le cas des puits.

Après prélèvement les bouteilles sont étiquetées et conditionnées dans une glacière puis acheminées au Laboratoire d'Analyse Géochimique d'Eaux de Nkolbisson (LAGE) à Yaoundé pour l'analyse chimique.

II.2.3. Travaux de laboratoire

Les travaux de laboratoire ont consisté en la caractérisation physiographique du bassin versant de Sao, à la réalisation des diverses cartes de la zone d'étude, le conditionnement et le traitement des échantillons, et l'analyse des données obtenues.

II.2.3.1. Caractérisation physiographique du bassin versant de Sao

Cette caractérisation est obtenue à partir d'une image satellite (STRM) téléchargée sur le site DIVAGIS. Cette image a été traitée dans le logiciel ArcGIS 10.8 afin de ressortir dans un premier temps la morphométrie du bassin versant de Sao (la taille, la forme, ces contours, l'orientation, l'élévation et les pentes) et en second temps les caractéristiques hydrographiques. La méthodologie exécutée pour déterminer ces différents paramètres physiographiques du bassin versant du Sao est illustrée dans le tableau 3.

Les paramètres de base tels que la surface, le périmètre, les classes d'altitudes, les longueurs des cours d'eau, le relief, la hiérarchisation des cours d'eau du BVS sont obtenus à l'aide du logiciel ArcGis 10.8.

L'indice de compacité de Gravelius, la longueur, la largeur, le facteur forme, le rapport d'allongement, le rapport de circulation, la densité de drainage (Dd), le coefficient de torrentialité (Ct), le rapport de confluence (Rc), la pente moyenne du cours d'eau principale ont été évalués à l'aide des équations mathématiques développées par Gravelius (1914), Miller (1953), Shumm (1956) et Stahler (1957).

Tableau 3. Formules appliquées pour le calcul des paramètres morphométriques du bassin versant du Sao

Paramètres morphométriques	Formule	Reference
L'indice de compacité de Gravelius	$k_G = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}} = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$ P : périmètre ; A : surface	Gravelius (1914)
Longueur et largeur	$L = \frac{k\sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{k} \right)^2} \right] ;$ $l = \frac{A}{L}$	
Facteur forme (R _f)	$R_f = \frac{A}{L^2}$	Horton (1932)

Le rapport d'allongement (Re)	$R_e = \sqrt{(4 \times \frac{A}{p})} / L$	Shumm (1956)
Le rapport de circulation (Rc)	$R_c = 4\Pi A/p^2$	Miller (1953)
Ordre de cours d'eau	Hiérarchisation des cours d'eau	Stahler (1957)
La densité de drainage (Dd)	$Dd = \frac{L_w}{A} (Km/Km^2)$ Lw : longueur totale des cours	Horton (1945)
le coefficient de torrentialité (Ct)	$C_t = Dd \cdot \frac{N_1}{A}$ N ₁ le nombre de cours d'eau d'ordre 1	
Le rapport de confluence (Rc)	$R_c = \frac{N_w}{N_w+1}$ Nw nombre de cours d'eau d'ordre w	Schumm(1956)
Pente moyenne du cours d'eau principale	$P_{moy} = \frac{\Delta H}{L_p}$	

II.2.3.2. Bilan hydrologique

Le bilan a été établi à l'échelle mensuelle à partir de la pluie du mois (P), l'évapotranspiration potentiel (ETP) et de la réserve maximale en eau facilement utilisable (RFU) grace la méthode de Thornthwaite (1954) appliquée sur les données pluviométriques pour la période allant de 1951 à 2021. A partir des formules établies par Thornthwaite (1954), l'on procède au calcul de l'évapotranspiration potentielle de chaque mois en fonction de la température moyenne mensuelle par rapport aux indices thermiques mensuels (i) et la durée astronomique du jour à l'aide de la formule suivante :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda) ;$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i ;$$

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} ;$$

avec: $a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,4923$;

i: indice thermique mensuel ;

t : température moyenne mensuelle ;

I : indice thermique annuel ;

a : coefficient fonction I

F (λ): facteur de correction qui est fonction de la latitude et de la saison.

L'évapotranspiration potentielle obtenue va être comparé aux précipitations afin de déterminer l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve en eau du mois (R_i), la réserve maximale en eau facilement utilisable (RFU) par rapport à l'organigramme de calcul du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Figure 8).

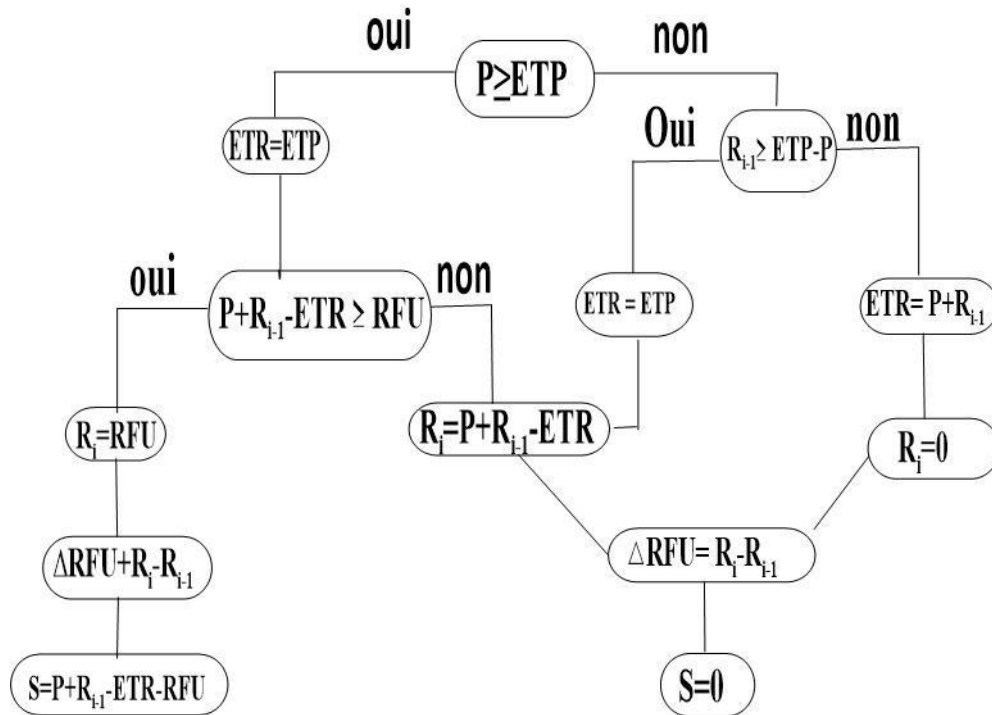


Figure 8: organigramme de Thornthwaite pour le calcul du bilan hydrique

II.2.3.3. Traitement et conditionnement des échantillons au laboratoire

Une fois au laboratoire, les échantillons ont été filtrés à travers une membrane poreuse dont la taille des pores est égale à 0,45 μm puis conditionnés dans des flacons préalablement lavés à l'eau déminéralisée et à l'eau d'échantillonnage. Deux phases sont obtenues après filtration : une phase liquide (filtrat) et une phase solide. Cette dernière est pesée pour obtenir les MES tandis que le filtrat est utilisé pour des analyses chimiques.

II.2.3.4. Analyse des paramètres chimiques

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

II.2.3.4.1. Méthodes

La concentration des ions bicarbonate (HCO_3^-) est déterminée pour obtenir l'alcalinité, cette dernière est obtenue par titrimétrie de 100 ml de l'échantillon brut par une solution de HCl de 0,02N jusqu'à un pH de 3. Le volume équivalent (V_e) est obtenu par la méthode graphique développée par Gran (1952). On a alors :

Alcalinité ($\mu\text{mol/l}$) = $(\text{Ca} \cdot V_e) / V_0$ avec Ca (μmol) = normalité d'acide et V_0 (en litre) : volume initial de l'échantillon.

Le dosage des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) ainsi que des ions fluorure (F^-), phosphate (PO_4^{3-}) et ammonium (NH_4^+) est réalisé par la méthode de chromatographie ionique HPLC (High Performance Liquid Chromatography) de type DIONEX ICS-90 (Figure...). Les concentrations des anions (Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) quant à elles sont obtenues par chromatographie ionique HPLC (High Performance Liquid Chromatography), sur Dionex ICS-100. Toutes ces analyses sont effectuées au LAGE à Nkolbisson. Après filtration, l'échantillon est acidifié jusqu'à un pH de 2 pour éviter d'éventuelles précipitations. Deux gouttes d'oxyde de lanthane III sont ajoutées pour éliminer les interférences dues aux autres éléments. Sa limite de détection est de 0,1 méq/l et sa reproductibilité varie de 1 à 3%. Les échantillons et les étalons sont placés dans un placeur automatique et les valeurs sont transmises sur un écran d'ordinateur où chaque pic correspond à un élément majeur. Les ions apparaissent dans l'ordre suivant : Na^+ et K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} , la précision de l'analyse est de 5 %. Cette méthode est basée sur le temps de rétention au travers d'une colonne de résine échangeuse d'ions. Le suivi de la conductivité de la solution au cours du temps constitue le chromatogramme. Ce dernier est alors comparé à celui des étalons utilisés.

II.2.3.4.2. Principes des différentes méthodes

La méthode de spectrométrie ICP-AES consiste à ioniser l'échantillon en l'injectant dans un plasma d'argon, ou parfois d'hélium, c'est-à-dire que les atomes de la matière à analyser sont transformés en ions par une sorte de flamme extrêmement chaude : jusqu'à 8000 K, puis les ions sont détectés dans le spectromètre.

La chromatographie ionique est basée sur les propriétés de résines échangeuses d'ions qui permettent une fixation sélective des anions ou des cations présents dans une solution. Sur la résine échangeuse d'ions conditionnés sous la forme d'une colonne chromatographie circule en permanence un éluant.

II.2.3.4. Calcul de la balance ionique

La balance ionique permet de vérifier si l'analyse a été bien faite ou pas. Elle permet de vérifier si une eau est bien équilibrée ou pas. Dans une eau bien tamponnée où l'analyse est bien faite, la TZ^+ est sensiblement égale à la TZ^- . Elle s'exprime par la formule suivante :

$$BI = \frac{\Sigma_{cations} - \Sigma_{anions}}{\Sigma_{cations} + \Sigma_{anions}} \times 100$$

L'erreur varie de 5% pour les eaux dont la somme des cations ou les anions est supérieur à 30 meq/l et de 10% pour celle dont elle est inférieure à 1 meq/l (schoeller 1962 et Ndam Ngoupayou 1997).

II.2.3.5. Traitement des données

L'examen et la présentation des résultats ont été réalisées par Excel 2016, JMP pro et Arc GIS. Le traitement des données est basé sur deux méthodes : la méthode hydrogéochimique et la méthode statistique.

II.2.3.5.1. Méthode hydrogéochimie

L'étude de la chimie des eaux a pour objectifs de déterminer les faciès des eaux, l'origine de ces paramètres chimiques, leur qualité, leur degré de potabilité et leur aptitude à l'irrigation.

Le diagramme triangulaire de Piper met en avant la minéralisation des eaux et permet de déduire les pourcentages des cations et anions majeurs et leurs classifications. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques (Philippe., 1996). Tandis que les diagrammes de Wilcox et Riverside permettent de donner l'aptitude des eaux à l'irrigation.

L'indice de qualité des eaux (IQE) est une technique de classification de la qualité des eaux. Quinze paramètres physico-chimiques des eaux du bassin versant du Sao ont été sélectionnés pour le calcul de cet indice. Cette technique de classification des eaux est basée sur la comparaison de la qualité des eaux du bassin étudié avec la norme des eaux établie par l'OMS. L'IQE est déterminé en utilisant la méthode de l'indice pondéré (Brown *et al.*, 1970 ; Brown *et al.*, 1972 ; Chatterji et Raziuddin., 2002 ; Yidana et Yidana., 2010). Dans cette démarche le poids relatif (W_i), la constante de proportionnalité (k) et l'évaluation de la qualité (Q_i) propre à chaque paramètre physico-chimique est déterminé selon les formules suivantes :

$$w_i = \frac{1}{s_i}$$

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/s_i)}$$

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i}\right) \times 100$$

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

C_i : concentration de chaque paramètre en mg/l

S_i : valeur maximale de la norme de l'OMS de chaque paramètre

II.2.3.5.2. Méthode statistique

L'analyse statistique est un ensemble de techniques qui ont pour objet de faciliter la visualisation des données, de révéler leur structure sous-jacente et d'extraire certaines variables importantes (Gournay., 2012 ; Glélé Kakaï *et al.*, 2016). Plusieurs techniques sont utilisées pour les analyses hydro chimiques par la méthode statistique. Seule l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la matrice de corrélation (MC) seront utilisées dans le cadre de ce travail. La matrice de corrélation est obtenue à partir des coefficients calculés sur plusieurs variables prises deux à deux et qui permet de noter des associations entre variables, qui peuvent montrer la cohérence globale de l'ensemble de données (Geler *et al.*, 2002 ; Everitt and Horthorn, 2011).

L'Analyse en Composante Principale (ACP) est une technique d'analyse statistique multivariée qui permet de réduire les données et déchiffrer des modèles au sein des grands ensembles de données (Matiados *et al.*, 2014 ; Mfonka *et al.*, 2015 ; Rakotondrabe *et al.*, 2017b). Elle est utilisée pour mettre en évidence les relations entre les paramètres chimiques et regrouper ceux qui ont un comportement semblable. Cette dernière a été réalisée sur les cations et anions majeurs ainsi que sur les paramètres physiques (pH, Cond, TDS et MES).

Conclusion

La méthodologie adoptée consistait à présenter les matériels utilisés, les méthodes d'investigation sur le terrain et en laboratoire. Au cours de cette phase vingt et cinq échantillons d'eaux (puits et rivières) ont été prélevés. Les paramètres physiques ont été pris in-situ et les échantillons prélevés ont été conditionnés et transportés au laboratoire. Les travaux de laboratoire ont consisté à déterminer les paramètres chimiques à partir de la chromatographie ionique et les résultats sont présentés dans le chapitre suivant : dépouillement, synthèse et interprétation des données.

CHAPITRE III : RESULTATS, DISCUSSION ET INTERPRETATION

Ce chapitre présente dans un premier temps les caractéristiques physiographiques du bassin versant du Sao, ensuite son bilan hydrologique et enfin la caractérisation physico-chimique des eaux du bassin versant étudié.

III.1. CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DU SAO

III.1.1. Caractéristiques géométrique et morphométrique

Du point de vue géométrique, le bassin versant du Sao a une surface de 24,35 Km² et un périmètre de 26,88 Km. Son indice de Gravelius est égal à 1,54, traduisant une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent dont la longueur et la largeur ont des dimensions respectives de 11,44 et 2,13 Km (Tableau 4).

Les paramètres morphométriques (Tableau 4) quant à eux sont obtenus à partir de la répartition hypsométrique du bassin versant (Tableau 4). La courbe hypsométrique (Figure 9) et la carte de répartition des altitudes (Figure 10) permettent ainsi de déterminer les altitudes maximale (1630 m), minimale (1267 m), médiane (1480 m), moyenne (1410,26 m). Par ailleurs, les indices de pente globale et de roche sont respectivement de l'ordre de 0,11 et 3,57 ce qui permet de dire que le bassin versant du Sao est accidenté. La forme allongée et le fait que la longueur soit de cinq fois supérieur à la largeur présume que le bassin est mal drainé (Nambi *et al.*, 2015 ; Kouedjou *et al.*, 2021).

Tableau 4. Éléments caractéristiques du relief du bassin versant du Sao

Paramètres	Symboles	Valeurs	Unités
Altitude minimale	H Min	1267	m
Altitude maximale	H Max	1630	m
Altitude moyenne	H moy	1410,26	m
Altitude médiane	H méd	1480	m
Dénivelée utile	Du	-1310	m
Indice de pente moyenne	Inp	0,035	/
Indice de pente globale	Ig	-0,11	/
Indice de pente de roche	Ip	3,57	
Dénivelée spécifique	Ds	-564,94	
Facteur de forme	R _f	0,18	
Rapport d'allongement	Re	0,67	
Rapport circulaire	Rc	0,423	

Tableau 5. Répartition en pourcentage de la surface élémentaire du bassin du Sao

Altitudes (m)	Hauteur moyen (m)	Surfaces partielles Ai		Surfaces cumulées		Ai*Hi
		Km ²	%	Km ²	%	
1400-1630	1515	9,94	40,83	9,94	40,84	15059,1
1300-1400	1350	11,83	48,60	21,77	89,44	15970,5
1267-1300	1283	2,49	10,23	24,26	99,67	3194,67
1267	1267	0,08	0,33	24,34	100	101,36

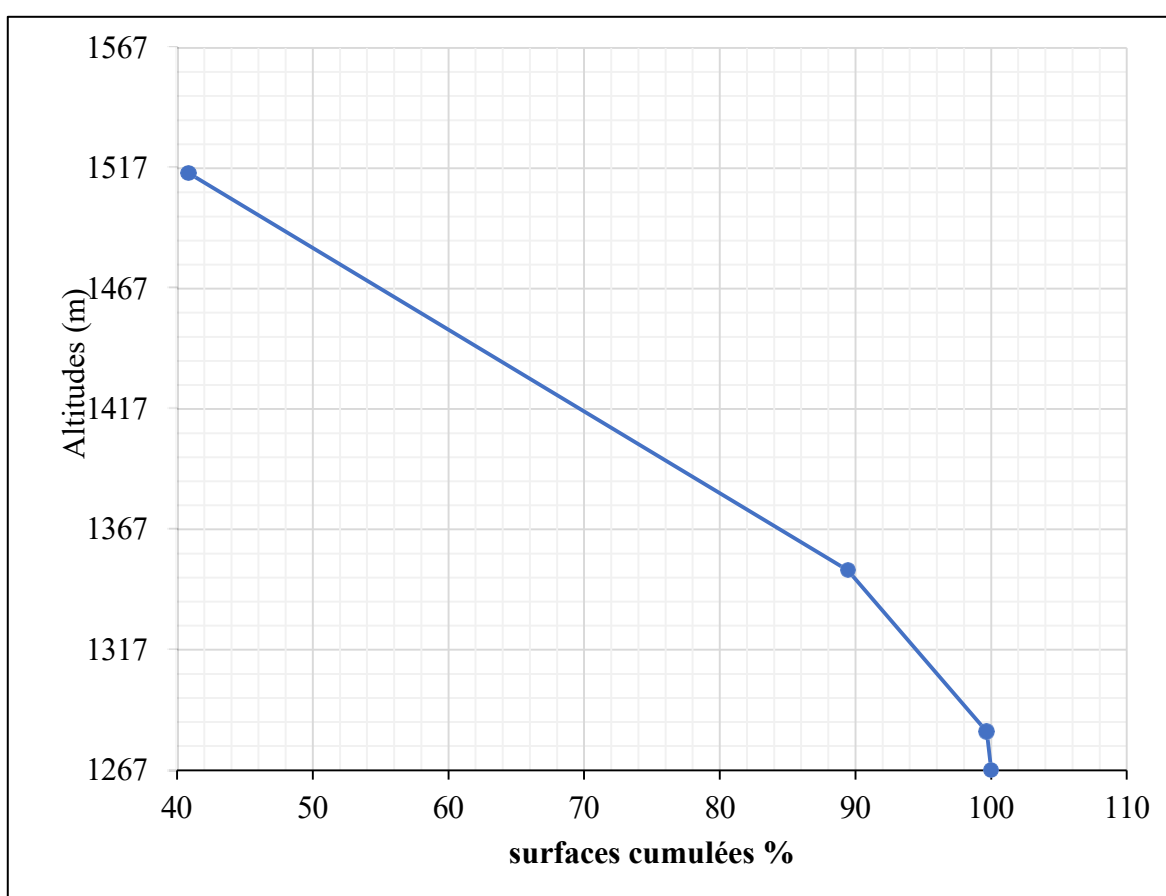


Figure 9: Courbe hypsométrique du bassin versant du Sao

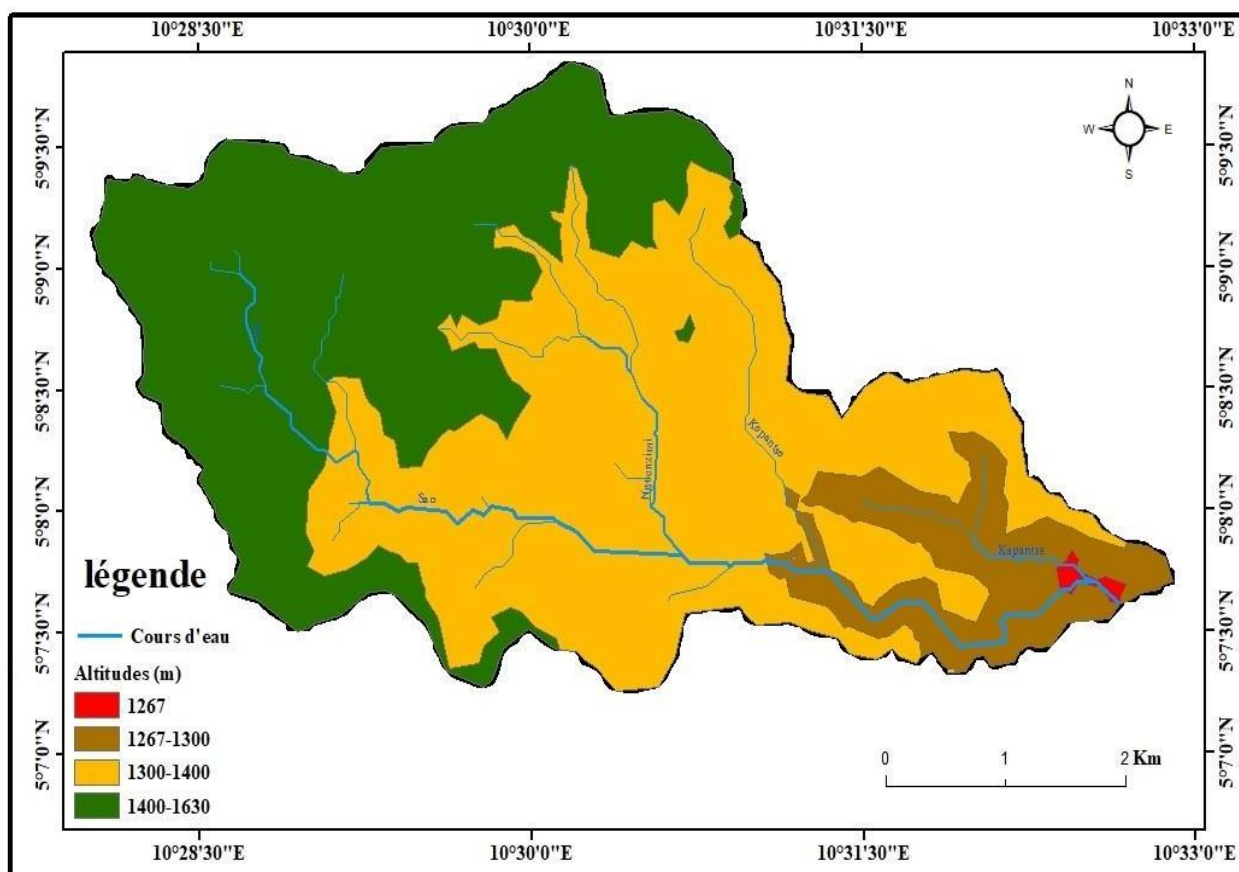


Figure 10 : morphologie du bassin versant du Sao

III.1.2. Caractéristiques hydrographiques

La hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant du Sao est mise en évidence par la figure 11. Celui-ci présente un réseau hydrographique constitué de 17 cours d'eau au total, dont 12 de premier ordre, 4 de deuxième ordre et 1 de troisième ordre. Les longueurs de ces différents cours d'eau sont comprises entre 119,9 et 7332,21 m (Tableau 6). Les paramètres de développement du réseau hydrographique sont consignés dans le tableau 7. A partir de ces valeurs, l'on remarque que le rapport de confluence est 3 et 4 pour une moyenne de 3,5. Selon Thebe (1999), lorsque ce rapport est inférieur à 5, le réseau hydrographique est de type "chêne" caractérisé par une ramification bien développée avec notamment un espacement régulier des confluences. La valeur de la densité de drainage est 1,17 Km/Km², cette faible valeur de densité de drainage serait dû au caractère accidenté du relief. Ces résultats sont semblables à ceux de Kouedjou (2021) dans le bassin versant de la Menoua. Le coefficient de torrentialité est 0,57 et la pente moyenne du cours d'eau est 49,52.

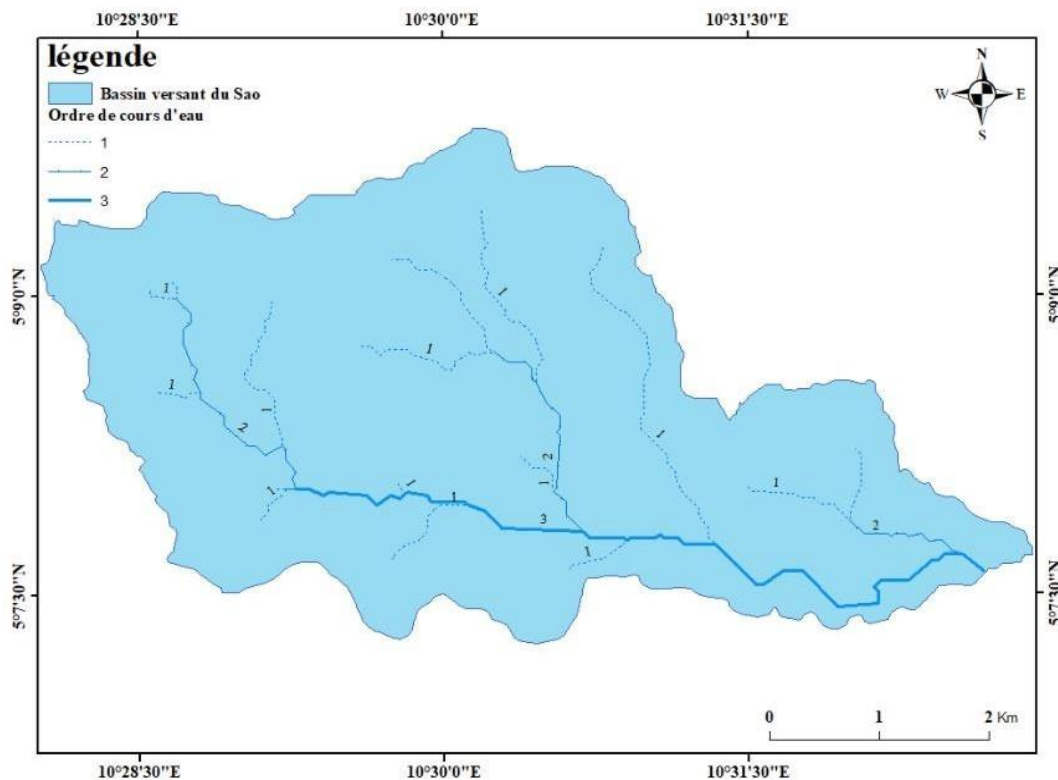


Figure 11: ordre du réseau hydrographique

Tableau 6. Caractérisation métrique du réseau hydrographique

Ordre des talwegs	Nombre de cours d'eau	Longueur minimale (m)	Longueur maximale (m)	Longueur totale (m)
1	12	119,93	3301,10	12725,306
2	4	169,767	3612,45	8369,657
3	1			7332,21

Tableau 7: paramètres hydrographique du bassin versant du Sao

Densité de drainage	1,17 km/km ²
Densité hydrographique	0,698 km ⁻²
Rapport de confluence	3 et 4
Longueur d'écoulement	0,41
Coefficient de torrentialité	0,57
Pente moyenne	49,52

III.2. BILAN HYDROLOGIQUE

Le bilan hydrologique exprime la répartition des différents volumes d'eau compris dans chacune des parties du cycle de l'eau, pour une période et un bassin donné. Son équation globale s'écrit :

$$P = D + I + ETR$$

P : précipitations

D : drainage

I : infiltration

ETR : évapotranspiration réelle

A partir des valeurs mensuelles de l'ETP calculées (Tableau 8) et celles des précipitations (P) de la station météorologique de Bagangté, on calcule les autres paramètres du bilan qui sont l'évapotranspiration réelle (ETR), la réserve facilement utilisable (RFU), l'excédent de l'écoulement (S) et le déficit agricole (DA) à l'aide de l'organigramme de Thornthwaite (fig. 17). Pour le calcul de l'ETR, on fixe une valeur de 100 mm comme réserve qui correspond à la quantité maximale d'eau que le sol peut retenir en y soustrayant les écoulements souterrains ; de ce fait, le mois de mars est pris comme référence car correspondant à la période de l'année où la réserve en eau du sol commence à se reconstituer après un long étiage.

Le tableau 9 et 10 représente les paramètres des bilans hydrologique et hydrique de la zone d'étude de 1951 à 2021. L'équation du bilan permet de déduire l'infiltration ($I = P - ETR - D$) qui est le passage de l'eau de la surface du sol à l'intérieur de celui-ci. Pour le bassin versant du Sao, on a $P = 1317$ mm ; $ETR = 780,67$ mm ; $D = 375,34$ mm ; $I = 160,99$ mm.

On y constate une infiltration moyenne interannuelle faible de l'ordre de 12,22 % pour une hauteur moyenne d'eau précipité de 1317 mm. La quantité restante s'évapore de (59,22 %) et ruisselle (28,49 %). On note ainsi une perte de 87,71% par ruissellement et évaporation.

La recharge de la nappe s'amorce au mois de mars et se poursuit jusqu'au mois de juin (Figure 12), mois pour lequel la réserve atteint son maximum. De juin à novembre, cette réserve reste constante car les précipitations sont plus ou moins abondantes durant ces mois. Les premiers prélèvements sur la réserve se produisent en décembre et s'épuisent complètement à partir du mois de janvier. On remarque une baisse du niveau piézométriques et des débits des sources.

Tableau 8: Valeurs de l'ETP selon THORNWAITE dans le bassin versant du Sao

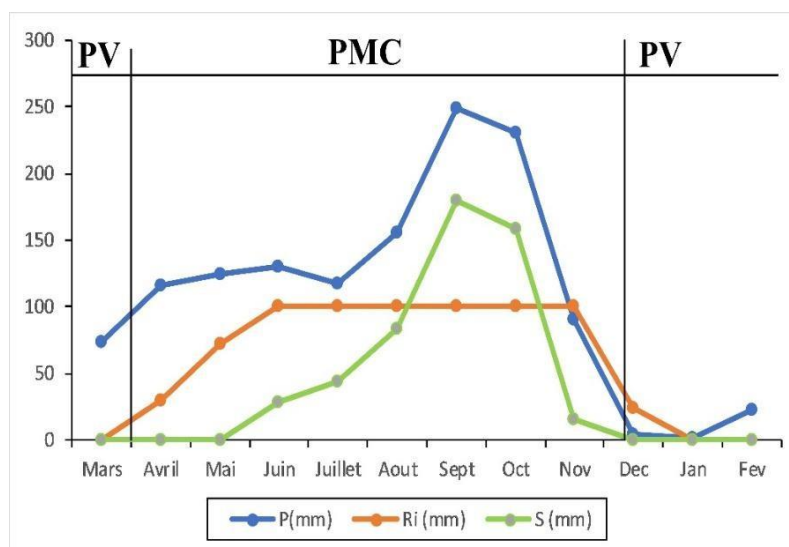
	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Total
F	1,03	1,02	1,06	1,03	1,06	1,05	1,01	1,03	0,99	1,02	1,02	0,93	
I	9,42	9,1	8,59	8,15	7,91	7,97	7,79	8,03	8,47	8,59	9,04	9,29	
ETP (mm)	91,49	86,06	82,15	73,9	72,69	72,83	70,06	72,26	75,07	79,05	85,16	80,94	941,66

Tableau 9: Paramètres du bilan hydrologique du bassin versant du Sao

	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Total
P(mm)	74,1	116,4	123,9	129,8	117,6	156,3	249,2	230,1	91,1	3,8	2,2	22,5	1317
ETP (mm)	91,49	86,06	82,15	73,9	72,69	72,83	70,06	72,26	75,07	79,05	85,16	80,94	941,66
ETR (mm)	74,1	86,06	82,15	73,9	72,69	72,83	70,06	72,26	75,07	79,05	26,95	22,5	780,67
DA	17,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58,21	58,44	134,04
R_i (mm)	0	30,34	72,09	100	100	100	100	100	100	24,25	0	0	
ΔRFU (mm)	0	30,34	41,75	27,91	0	0	0	0	0	-75,25	-24,75	0	0
Le	0	30,34	41,75	55,9	44,91	83,47	179,14	157,84	16,03	-75,25	-24,75	0	536,33
P-ETP	-17,39	30,34	41,75	55,9	44,91	83,47	179,14	157,84	16,03	-75,25	-82,96	-58,44	375,34
S (mm)	0			27,99	44	83,47	179,14	157,84	16,03	0	0	0	508,47

Tableau 10: paramètres analytiques du bilan hydrique vérifiant la relation $P = E + R + I$

Paramètres	P	E	R	I
Valeur en mm	1317	780,67	375,34	160,99



PMC : période de mise en charge ; PV : période de vidange

Figure 12: période de recharge et de vidange des nappes libre du bassin versant du Sao

III.3. VARIATION DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DU SAO

III.3.1. Paramètres physiques (pH, conductivité et TDS)

Le pH des eaux du bassin versant du Sao varie de 5,75 à 8,85 avec une moyenne arithmétique de 6,92 (Tableau 11 et figure 13). Les eaux souterraines sont en majorité acides. Cependant, certains puits P11, P12, P13), forage (F) ainsi que la source (S2) présentent un pH légèrement basique. Les eaux de surface quant à elles ont des valeurs de pH basique à l'exception des échantillons R3 et R4 qui présentent des valeurs acides. Les valeurs de pH des eaux du bassin versant du Sao traduisent ainsi dans l'ensemble des eaux acides à basique. Cette acidité serait liée au type de sols traversé dans la région (Ndam, 1997, Mfonka *et al.*, 2020) mais aussi à la présence des acides provenant de la décomposition de la matière organique, aux pluies qui sont également acides (Rakatondrabe *et al.*, 2017, Bon *et al.*, 2021b). Le pH à tendance basique des eaux de surface pourrait s'expliquer par le rejet dans ces eaux des produits chargés en ions OH⁻ provenant des eaux savonneuses et des détergents issus des lessives, du nettoyage des véhicules et de la vaisselle. Le caractère acide obtenu majoritairement dans le cadre de cette étude a déjà été mis en évidence par Nono *et al.*, (2008), Mfonka *et al.*, 2015 ; Santsa Nguefack et Ngassoum (2018) dans le même contexte ; par Taghuo, (2017) dans les eaux du Nyong à Olama, Ngouh *et al.*, (2020) dans le bassin versant du Nkié à Yaoundé ; Tuekam Kayo *et al.*, (2021), Ndonda Etongo (2022) dans les eaux de Mbalmayo. 64% des échantillons analysés aux normes de l'OMS (6,50 – 8,50) et de l'ANOR (6,5 - 9) tandis que 34% sont hors norme.

Les valeurs de la conductivité électrique sont comprises entre 12,2 µS/cm et 225,52µS/cm (Tableau 11 et Figure 13). L'ensemble des eaux du bassin versant présente une minéralisation très faible à peu accentuée (Detay., 1993). Les valeurs les plus faibles sont rencontrées au niveau de la source et du point R1 du cours d'eau Sao tandis que les plus fortes valeurs sont rencontrées dans le forage et le puits P12. Ces relatives fortes conductivités électriques dans les eaux souterraines par rapport aux eaux de surface seraient à mettre en relation avec le temps de contact eau-roche qui est plus important dans les eaux souterraines (forages et puits) par rapport aux cours d'eau où le renouvellement des eaux est rapide. La minéralisation relativement plus élevée dans le forage (nappe profonde) peut certes s'expliquer par le séjour plus long des eaux, mais surtout par la quasi-inexistence de lessivage et d'adsorption des ions par les minéraux argileux, d'où leur mise en solution facile et leur forte concentration par rapport aux eaux des sources (nappes superficielles) (Nono *et al.*, 2008). Ces valeurs de conductivités enregistrées dans le bassin versant du Sao sont inférieures

à celles obtenus par Olivry et Naah ; (1978) ($189 \mu\text{S/cm} \leq \text{CE} \leq 389 \mu\text{S/cm}$) dans le Nkoup à Foubot qui draine un substratum volcanique d'âge récent.

Les TDS quant a eu varient de 8,45 mg/l à 145,6 mg/l avec une moyenne de 48,03 mg/l (Tableau 11).

Tableau 11. Niveau de variation des paramètres physiques des eaux du BV du Sao

Paramètres	pH	Conductivité $\mu\text{S/cm}$	TDS mg/l
Min	5,75	12,2	8,45
Max	8,85	225,52	145,6
Moyenne	6,92	69,43	48,03
Med	6,72	56	44,25
Var	0,72	3208,83	1423,74
ET	0,87	57,81	38,51

Min (minimum), Max (maximum), Moy (moyenne), ET (écart-type), Med (médiane), Var (variance).

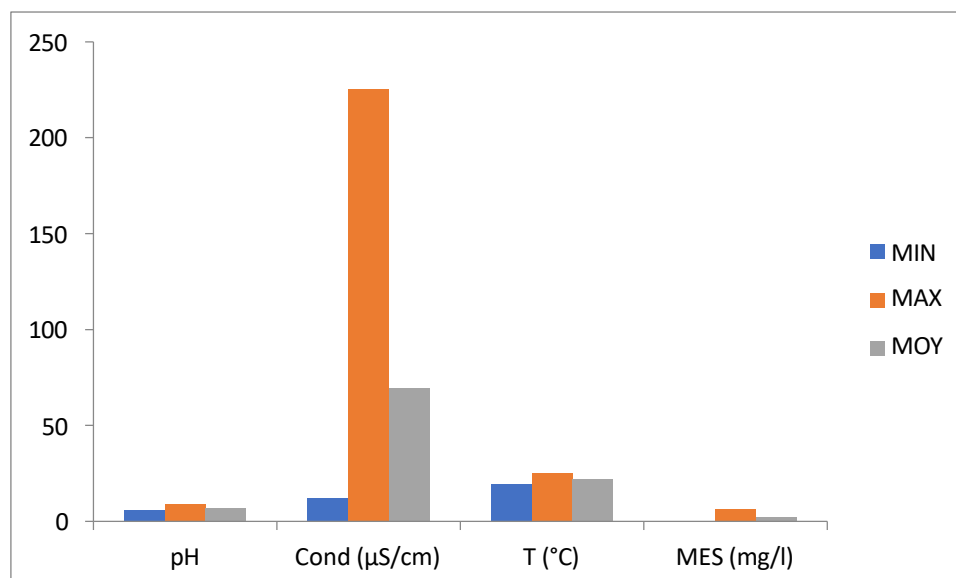


Figure 13 : Niveaux de concentration des paramètres physiques

III.3.2. Paramètres chimiques

III.3.2.1. Cations majeurs et somme des équivalents cations

Les cations majeurs sont représentés par les ions calcium, magnésium, sodium et potassium. Les concentrations en ion Magnésium varient entre 29,7 et 1730 $\mu\text{eq/l}$, avec une moyenne de 565,2 $\mu\text{eq/l}$. L'ion sodium quant lui présente des variations comprises entre 49,9 et 9011,13 $\mu\text{eq/l}$ pour une moyenne de 771,3 $\mu\text{eq/l}$. Les concentrations en ion potassium oscillent entre 5,6 et 109,7 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 31,6 $\mu\text{eq/l}$ tandis que les ions calcium et ammonium présentent des concentrations variantes respectivement entre 78,6 et 2986,2 $\mu\text{eq/l}$ pour une moyenne de 687,6 $\mu\text{eq/l}$ et entre 0,7 et 62 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 16,8

$\mu\text{eq/l}$. la somme des équivalents cations est comprise entre 177,5 et 12772 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 2072,8 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 12 et Figure 14).

Les concentrations en K^+ sont très faibles par rapport à celles de Na^+ dans toutes les eaux du BVS. Cette très faible teneur en potassium serait due au fait que, d'une part, les ions K^+ sont plus adsorbés par les argiles que les ions Na^+ du fait de leur rayon atomique largement supérieur à celui du sodium, et d'autre part, par la haute solubilité du sodium qui atteste de sa forte concentration dans les eaux.

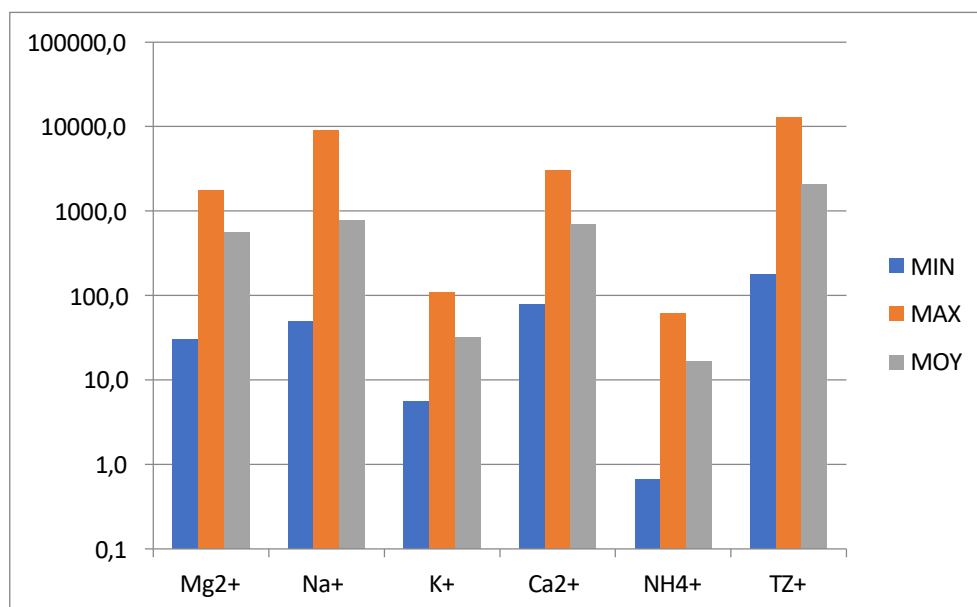


Figure 14: Niveau de variation des cations majeurs et TZ^+ ($\mu\text{eq/l}$) dans les eaux du bassin versant du Sao

III.3.2.2. Anions majeurs et sommes des équivalents anions

Les concentrations en ions chlorure sont comprise entre 3,68 et 839,8 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 187,9 $\mu\text{eq/l}$, celle des ions sulfate varie entre 2,4 et 281,7 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 71 $\mu\text{eq/l}$. Les concentrations en ions bicarbonate et ion nitrate sont comprises respectivement entre 0,01 et 16,6 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 3,6 $\mu\text{eq/l}$ et entre 0,4 et 2298,4 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 365,7 $\mu\text{eq/l}$

La concentration des équivalents anions est comprise entre 30,74 $\mu\text{eq/l}$ à 2215,9 $\mu\text{eq/l}$ avec une moyenne de 347,28 $\mu\text{eq/l}$ (Tableau 13 et Figure 15).

Les concentrations de nitrates sont plus importantes dans les eaux souterraines (P7, P8 et P10) que ceux des autres puits, des sources, du forage et des eaux de surface. Ces différentes teneurs seraient liées à l'utilisation des fertilisants et la présence des latrines à fonds perdue. Les faibles teneurs de nitrate dans les eaux des rivières du bassin versant du Sao seraient dus au processus de dénitrification. Ces teneurs de nitrate sont supérieures à ceux obtenues dans les

eaux du bassin versant du Nchi (Mfonka *et al.*, 2015), et également à ceux obtenues par Njikeu (2015) et Njinwoua (2015) respectivement dans les eaux du bassin versant du Nde et les eaux du bassin versant du Noun à Bayomen.

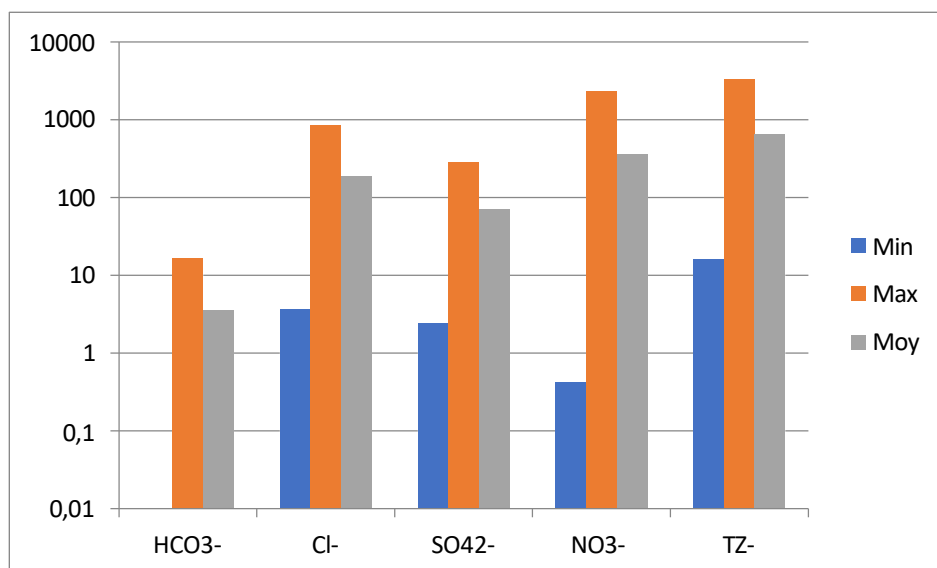


Figure 15: variation des anions majeurs et TZ⁻ (μeq/l) dans les eaux du bassin versant du Sao

III.3.2.3. Autres éléments

Les concentrations en ions fluorure sont comprises entre 0,2 et 53,8 μeq/l avec une moyenne de 12,3 μeq/l, tandis que celle des ions ammonium et phosphates oscillent respectivement entre 0,7 et 62 μeq/l pour une moyenne de 0,3 μeq/l et entre 0 et 34,3 μeq/l pour une moyenne de 5,6 μeq/l (Tableau 13 et Figure 16).

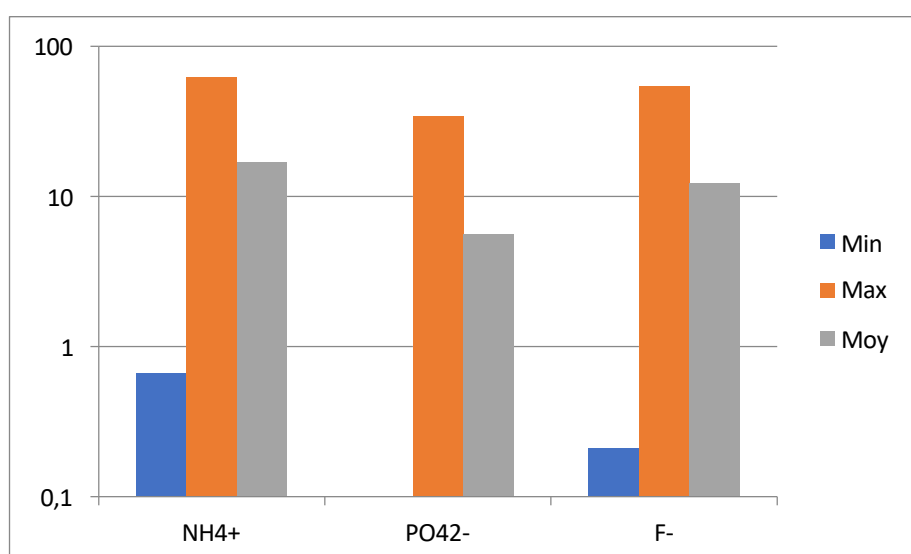


Figure 16 : variations des autres éléments dans les eaux du bassin versant du Sao

III.3.2.4. Balance ionique

La balance ionique du bassin versant du Sao est comprise entre -36% et 97% avec une moyenne de 60%. Ces valeurs traduisent un déficit anionique dans les eaux du bassin versant du Sao. Ce déficit anionique peut être expliqué par : la faible minéralisation des eaux du bassin versant et également à cause de la présence des anions organiques (Braun et al., 2002 ; Boeglin et al., 2003 ; Braun et al., 2005). Ce déficit anionique est également observé par Rakotondrake dans les eaux de Bétaré-Oya en 2017 dans ces travaux. La balance ionique permet de contrôler l'équilibre ionique à travers la TZ^+ et TZ^- des eaux (Scholler 1962).

Tableau 12: Niveaux de variation des paramètres chimiques en mg/l (milligramme par litre) dans quelques eaux souterraines et d'écoulement du bassin versant du Ndé.

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻
MIN	1,15	0,01	0,22	0,36	1,57	0,00	0,13	0,03	0,11	0,00	0
MAX	207,17	1,12	4,29	21,02	59,84	1,02	29,77	142,52	13,53	1,01	1,08
MOY	17,73	0,30	1,23	6,87	13,78	0,23	6,66	22,68	3,41	0,22	0,18
Ecart type	43,13	0,32	0,81	4,94	12,19	0,23	8,36	45,29	3,29	0,26	0,30
Variance	1860,52	0,10	0,65	24,36	148,52	0,05	69,84	2050,91	10,81	0,07	0,09
Médiane	3,56	0,22	1,02	8,58	13,43	0,15	1,79	1,25	2,51	0,19	0,07
Nombre	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

Tableau 13: Niveaux de variation des paramètres chimiques µeq/l (micro-équivalent par litre) dans quelques eaux souterraines et d'écoulement du bassin versant du Sao.

paramètres	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	TZ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	TZ ⁻
Min	29,7	49,9	5,6	78,6	0,7	177,5	0,01	3,68	2,4	0,0	0,4	0,2	16
Max	1730,0	9011,3	109,7	2986,2	62,0	12772,0	16,6	839,8	281,7	34,3	2298,4	53,8	3282,8
Moyenne	565,2	771,3	31,6	687,6	16,8	2072,8	3,6	187,9	71,0	5,6	365,7	12,3	646,72
Ecart type	406,1	1876,2	20,7	608,1	17,9	2531,6	4,3	235,7	68,5	9,5	730,4	11,9	976,43
Variance	412,9	1911,8	21,0	621,0	18,3	6152,7	4,4	238,2	68,6	9,5	742,4	12,1	915,28
Médiane	410,9	1950,3	20,7	634,7	18,7	1619,7	4,5	241,4	69,6	8,8	756,4	8,4	248,51
Nombre	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25

III.3.2.5. Facies hydrogéochimiques

Le diagramme de piper appliqué aux eaux du bassin versant du Sao (Figure 17), met en évidence des faciès chimiques de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien (52%), chloruré sodique et potassique (36%) et hyperchloruré calcique (12%). Ces faciès, définis par l'abondance des ions nitrates, chlorures, serait beaucoup plus d'origine anthropique et atmosphérique soit par chloration des eaux souterraines, soit par le traitement des sols et des plantes par : les engrais chimiques (les engrais minéraux, les engrais organiques, et les organo-minéraux) pour améliorer et accroître le rendement des cultures et les pesticides chimiques, pour éradiquer les insectes nuisibles et les acariens par les insecticides ; les

mauvaises herbes par les herbicides ; traiter les cultures et les rendre saines à l'aide des fongicides et bactéricides.

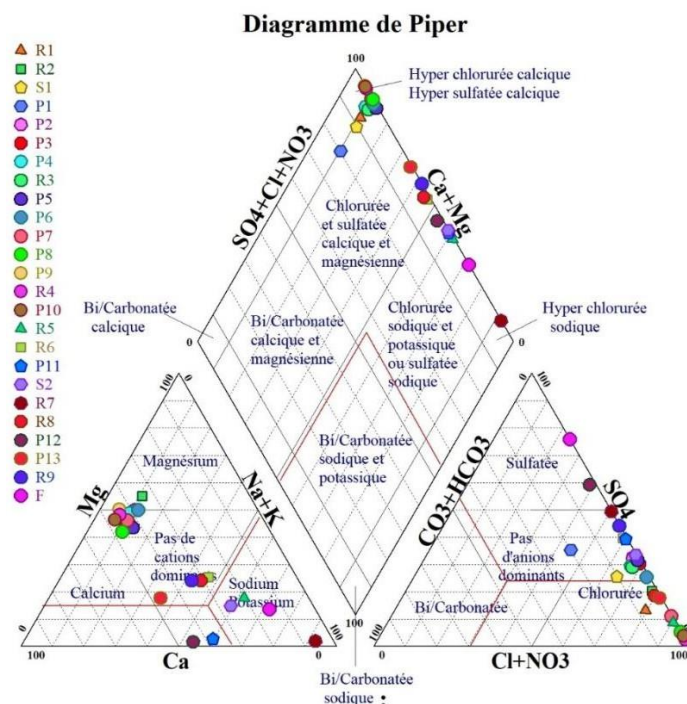


Figure 17: diagramme de Piper des eaux du bassin du Sao

III.4. Origines des éléments dans les eaux du bassin versant du Sao

Afin de mettre en évidence les similarités ou les oppositions entre les paramètres mesurés sur le terrain et les éléments chimiques analysés en laboratoire et d'autre part de mettre en exergue les éléments les plus corrélés. L'étude statistique multivariée a été menée à travers des corrélations inter-élémentaires et une analyse en composantes principales (ACP). L'analyse a porté sur 17 variables (pH, Cond, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , TZ^+ , TZ^-).

III.4.1. Matrice de Corrélation (MC)

La matrice de corrélation ci-dessous (Tableau 14) a un niveau de signification de $\alpha=0,05$. Elle met en avant :

- des fortes corrélations entre la TZ^+ et les ions Na^+ ($r = 0,74$), K^+ ($r = 0,79$) et Ca^{2+} ($r = 0,78$). Ces différentes corrélations montrent que les cations majeurs sont dominés par les ions Na^+ , K^+ et Ca^{2+} ;
- des fortes corrélations entre la TZ^- et les ions NO_3^- ($r=0,99$), Cl^- ($r=0,97$) ce qui montre que les anions majeurs sont dominés par les ions NO_3^- et Cl^- ;

- des fortes corrélations entre la TZ^+ et la TDS($r=0,74$), la TZ^+ et la Cond ($r=0,76$) qui mettent en évidence l'abondance des cations majeurs dans la minéralisations des eaux du bassin versant du Sao ;
- des fortes corrélations entre les ions NO_3^- et Cl^- ($r=0,93$) qui indiquent leurs origine commune ;
- la corrélation négative entre le pH et l'ion Cl^- ($r=-0,63$) serait dû à une concentration élevée des ions Cl^- dans un milieu faiblement acide.
- des fortes corrélations entre l'ion Na^+ , et les ions K^+ ($r=0,81$), NH_4^+ ($r=0,66$) et Ca^{2+} ($0,65$).

Ces différentes corrélations traduisent une origine commune et l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux du bassin versant.

Tableau 14. Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux du BVS

	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	PO_4^{2-}	pH	Cond	TDS	TZ^-	TZ^+	MES
Na^+	1,00																
NH_4^+	0,66	1,00															
K^+	0,81	0,55	1,00														
Mg^{2+}	0,39	-0,04	0,36	1,00													
Ca^{2+}	0,65	0,49	0,49	0,31	1,00												
F^-	-0,26	-0,30	-0,49	0,41	-0,04	1,00											
Cl^-	-0,20	-0,34	0,08	0,35	0,05	0,07	1,00										
NO_3^-	-0,18	-0,31	0,16	0,23	0,03	-0,04	0,93	1,00									
SO_4^{2-}	0,55	0,18	0,45	0,70	0,43	0,07	0,43	0,21	1,00								
HCO_3^-	-0,24	-0,21	-0,25	0,35	0,06	0,32	0,18	0,01	0,19	1,00							
PO_4^{2-}	-0,21	-0,25	-0,17	0,37	-0,03	0,50	0,18	0,19	-0,05	0,12	1,00						
pH	0,27	0,42	0,12	-0,22	-0,04	-0,05	-0,62	-0,45	-0,41	-0,40	-0,04	1,00					
Cond	0,68	0,49	0,44	0,44	0,75	0,07	-0,06	-0,20	0,61	0,17	-0,03	0,12	1,00				
TDS	0,65	0,48	0,40	0,44	0,75	0,09	-0,07	-0,21	0,59	0,19	-0,01	0,13	1,00	1,00			
TZ^-	-0,15	-0,31	0,16	0,32	0,07	0,01	0,97	0,99	0,33	0,08	0,20	-0,52	-0,12	-0,13	1,00		
TZ^+	0,97	0,61	0,79	0,52	0,78	-0,15	-0,08	-0,09	0,63	-0,11	-0,10	0,16	0,76	0,74	-0,05	1,00	
MES	0,17	0,22	0,00	-0,63	0,01	-0,40	-0,36	-0,31	-0,21	-0,38	-0,48	0,29	0,07	0,05	-0,35	0,03	1,00

III.4.2. Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse des variables de L'ACP des eaux du bassin versant du Sao met en évidence la proximité des éléments les uns des autres en formant trois grands regroupements bien distincts séparés par des grands angles, signe d'indépendance de leurs origines (Figure 18).

Le premier regroupement (entouré de couleur verte) situé dans la partie positive autour de l'axe F1 (59,50%) est constitué de la Conductivité électrique, la TDS, TZ^+ , des ions K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} et SO_4^{2-} il met en évidence une minéralisation des eaux liée au contact eau-

roche (minéralisation temps de séjour). Le calcium et le magnésium sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés. Leur présence est liée au contexte lithologique de la zone. Ce qui témoigne donc d'une origine géogénique. Na^+ et K^+ et tous éléments présentant une bonne corrélation avec Mg^{2+} et Ca^{2+} ont la même origine. Le sulfate est utile dans la croissance des plantes il est donc d'origine biologique et anthropique. Ce regroupement présente donc une minéralisation mixte (géogénique, biogénique et anthropique)

Le deuxième regroupement autour du facteur F_2 (couleur jaune) (25,7%) regroupe la TZ^- , le pH, les MES, les ions NO_3^- et Cl^- . La forte corrélation entre les ions Cl^- et les NO_3^- indiquerait une origine anthropique ou organique. La présence de ces ions en profondeur indiquerait alors un système naturellement ouvert et par conséquent une infiltration verticale et directe vers les zones saturée (Yao *et al.*, 2012). En somme, les différents regroupements étudiés montrent que la minéralisation des eaux du bassin versant du Sao est liée à trois phénomènes importants. Il s'agit du phénomène de minéralisation par le contact eau-roche, du pluvio-lessivage, de la minéralisation issue des activités anthropiques. Cette méthode a été appliquée par plusieurs autres auteurs (Lallahem, 2002 ; Yao, 2009 ; Ahoussi *et al.*, 2010 ; Babaye, 2012, Mfonka *et al.*, 2015 ; Mangoua, 2021 ; Ndonda Etondo, 2022) et tous sont parvenus à la même conclusion.

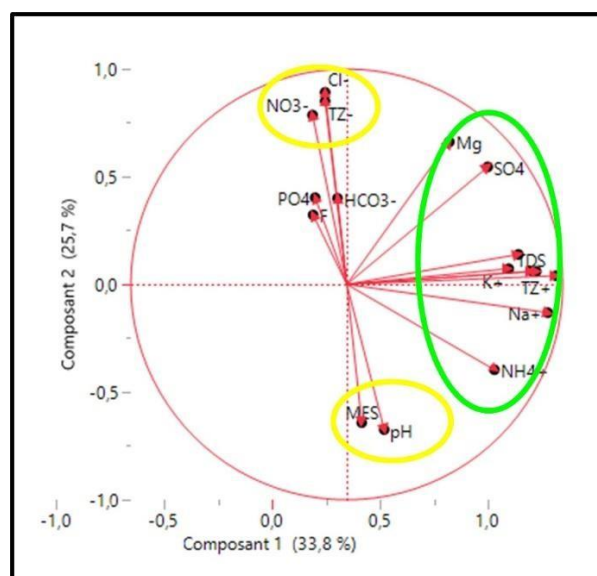


Figure 18: Analyse en composante principale des paramètres physico-chimiques du bassin versant du Sao

III.5. Vulnérabilité des eaux du bassin versant du Sao

Les eaux du bassin versant du Sao, subissent une forte pression anthropique. Ceci s'observe par la présence des fortes concentrations des ions chlorure et nitrate dans certains points d'eau souterraine. La vulnérabilité est fonction du type de nappe, de l'hydrodynamique et de la disposition des latrines ou toutes autres formes de déchets en surface ou en profondeur susceptible de souiller la nappe et les eaux de surface. Les polluants d'origines superficielles peuvent diffuser librement dans le sol de la zone non saturée jusqu'au niveau de la nappe. La présence de ces ions dans les eaux peut détériorer la santé des populations environnantes. Il est donc important de surveiller les sources de pollution dans le bassin.

III.6. Facteurs environnementaux contrôlant la qualité des eaux du bassin versant du Sao

La présence trop élevée de la concentration de certains éléments dans les eaux du bassin versant du Sao résulterait de plusieurs facteurs.

III.6.1. Nature Lithologique et âge de la roche

La composition minéralogique de la roche est liée au degré de solubilité de celle-ci. Le bassin étudié est constitué des basaltes à textures porphyritiques (Tchouankoue *et al.*, 2012 ; Wotchoko *et al.*, 2015). Cet ensemble rocheux dont les minéraux sont lessivés en dehors du quartz serait à l'origine des faibles minéralisations des eaux analysées. La relation entre l'âge de la roche et le taux d'érosion chimique a été établie par Gislason *et al.*, (1996) à partir de l'étude des basaltes d'Islande. Il note une diminution du taux d'altération chimique avec l'âge de la roche et conclut qu'il est moins important pour les basaltes vieux (1 Ma), du fait de leur faible teneur en verre (matériau facilement érodable), que pour les basaltes jeunes. Meybeck (1986) donne une séquence de solubilité des roches en étudiant différents types de roches. Pour les roches silicatées, l'ordre de solubilité est le suivant : **amphibolites et serpentite > pelites > gabbro > basaltes > trachyandésites et rhyolites > grès > gneiss et micaschistes > granites**. Il en est de même pour les minéraux dans la séquence de stabilité des minéraux silicatés de Goldich, (1938) où les olivines et les plagioclases calciques sont les moins stables et les plus facilement altérables alors que le quartz est le plus difficilement altérable : **olivine > augite > hornblende > biotite > feldspath > muscovite > quartz**.

III.6.2. Types de Sols

Les sols ferralitiques sont les sols les plus rencontrés dans le bassin et ils constituent de quantités notables d'hydroxydes d'alumine (Segalen 1962). Ces sols sont généralement très épais et de ce fait ralentissent l'infiltration. Alors le substratum rocheux est à l'abri des eaux d'infiltration, réduisant ainsi l'altération chimique et par conséquent la teneur des

éléments chimiques dissous. Le sol constitué dans ce sens un élément d'épuration et de recyclage des eaux.

III.6.3. Relief

La largeur, la longueur, les différentes altitudes du bassin ont une influence sur l'écoulement affectant les débits des cours d'eau, la quantité d'eau ruisselé, le taux des matières dissous et solides.

III.6.4. Végétation

Le couvert végétal protège le sol contre les agents d'érosion. La concentration en silice et en conductivités électrique diminue au fur et à mesure qu'on se déplace de la zone de savane vers les zones de forêt. La végétation est le facteur de répartition de l'érosion mécanique, raison pour laquelle l'érosion mécanique augmente du Sud (zone de forêt) vers le Nord (zone de savane) en fonction de la densité de la végétation (Lienou *et al.*, 2005).

III.6.5. Climat

Les précipitations et les températures sont deux grands facteurs du climat, des grandes précipitations vont augmenter le débit des cours d'eau et ce qui va favoriser l'érosion mécanique et dissolution de certains minéraux. L'écoulement va donc influencer l'altération chimique en faisant varier les flux spécifiques de matières (Meybeck et Ragu, 1997 ; Gaillardet *et al.*, 1999).

L'augmentation de la température va favoriser l'évapotranspiration et accroître la vitesse de dissolution des minéraux, de même que le degré de saturation des eaux en minéraux dissous. C'est dans ce sens que Velbel (1993) démontre que les plagioclases s'altèrent plus vite sur un bassin à température élevée.

III.6.6. Anthropisation

L'homme agit sur l'eau à travers de nombreuses actions : rejets ménagers, industriels, latrines à fonds perdus ou encore ses activités agricoles avec l'emploi des intrants (engrais). L'agriculture est plus marquée à l'amont du bassin ainsi que l'emploi des intrants. Les éleveurs facilitent l'érosion des surfaces de même que l'intensité de l'altération et transport des matières.

III.7. Principaux usages des eaux du bassin versant du Sao

III.7.1. Usage domestique

Il est déterminé à partir de l'Indice de qualité de l'eau. Le poids relatif (W_i) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de proportionnalité (K) sont déterminés en fonction des valeurs maximales de la norme des eaux de l'OMS (Tableau 15). Les concentrations de l'IQE obtenues pour l'ensemble des points échantillonnés varient entre

0,2≤IQE≤7,32 (Tableau 16) traduisant ainsi une eau de qualité excellente pour les activités humaines telles la toilette, les baignades, la vaisselle, la lessive. Compte tenu des fortes concentrations en nitrate dans les puits P7, P8, P9, P10 et dans le cours d'eau, de la concentration en sodium au-dessus de la norme dans le forage d'une part, et du fait que les analyses bactériologiques n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude, il est recommandé un traitement préalable avec toute consommation humaine.

Tableau 15. Poids relatif des paramètres physico-chimique et norme de l'OMS de la qualité des eaux

Paramètres	Unités	Normes OMS	$\frac{1}{S_i}$	Poids relatif (W_i)
Température	°C	25	0,04	0,024
pH	/	6,50-8,50	0,118	0,071
Conductivité électrique (CE)	μS/cm	1500	0,0006	0,0004
MES	mg/L	25-40	0,025	0,015
Chlorure (Cl ⁻)	mg/L	≤ 250	0,004	0,0024
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/L	≤ 250	0,004	0,0024
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/L	50	0,02	0,012
Calcium (Ca ²⁺)	mg/L	≤ 500	0,002	0,0012
Magnésium (Mg ²⁺)	mg/L	125	0,008	0,0048
Sodium (Na ⁺)	mg/L	≤ 200	0,005	0,003
Potassium (K ⁺)	mg/L	12	0,083	0,05
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/L	125-130	0,0076	0,0046
Fluorure (F ⁻)	mg/L	1,5	0,67	0,4
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/L	1,5	0,67	0,4
Phosphates (PO ₄ ³⁻)	mg/L	5	0,2	0,12
		Somme	1,68	1,1108
		K	0.6	

Tableau 16 : Valeur de l'indice IQE et classe de qualité des eaux du bassin versant du Sao

Échantillons	IQE	Classe de qualité
R1	0,64	Excellente
R2	1,01	Excellente
S	0,25	Excellente
P1	0,57	Excellente
P2	0,62	Excellente
P3	0,59	Excellente
P4	0,57	Excellente
R3	0,49	Excellente
P5	0,21	Excellente
P6	0,55	Excellente
P7	1,10	Excellente
P8	0,98	Excellente
P9	0,24	Excellente
R4	0,20	Excellente
P10	0,29	Excellente
R5	1,99	Excellente
R6	0,27	Excellente
P11	0,88	Excellente
S2	0,32	Excellente
R7	2,11	Excellente
R8	0,67	Excellente
P12	4,00	Excellente
P13	0,35	Excellente
R9	0,31	Excellente
F	7,32	Excellente

III.7.2. Aptitude des eaux à l'irrigation et à l'agriculture

Il existe plusieurs critères de contrôle de la qualité des eaux destinée à l'activité agricole. Dans cette étude les diagrammes de Wilcox (1955) et de Riverside ont été utilisés pour décrire le pouvoir alcalin de l'eau.

III.7.2.1. Classification des eaux par le digramme Riverside ou Richard 1954

Le diagramme de Riverside (Figure 19) est fondé sur la conductivité électrique et les paramètres de salinités (Sodium Absorption Ratio ou $SAR = Na/\sqrt{(Ca + Mg)/2}$ (concentrations en $\mu\text{eq/l}$)) en rapport avec l'usage agricole (Gouaidia, 2008). La classification des eaux à partir de ce diagramme révèle deux classes : la classe C_0S_1 48%, la classe C_1S_1

24%. Les 38% restant n'appartiennent à aucune classe à cause de leurs conductivités inférieures à 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En général, le pouvoir alcalin est faible. Et les conductivités comprises entre 20 et 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dès lors, ces eaux peuvent être utilisées pour l'irrigation de tout type de culture. (Bradaï *et al* 2008)

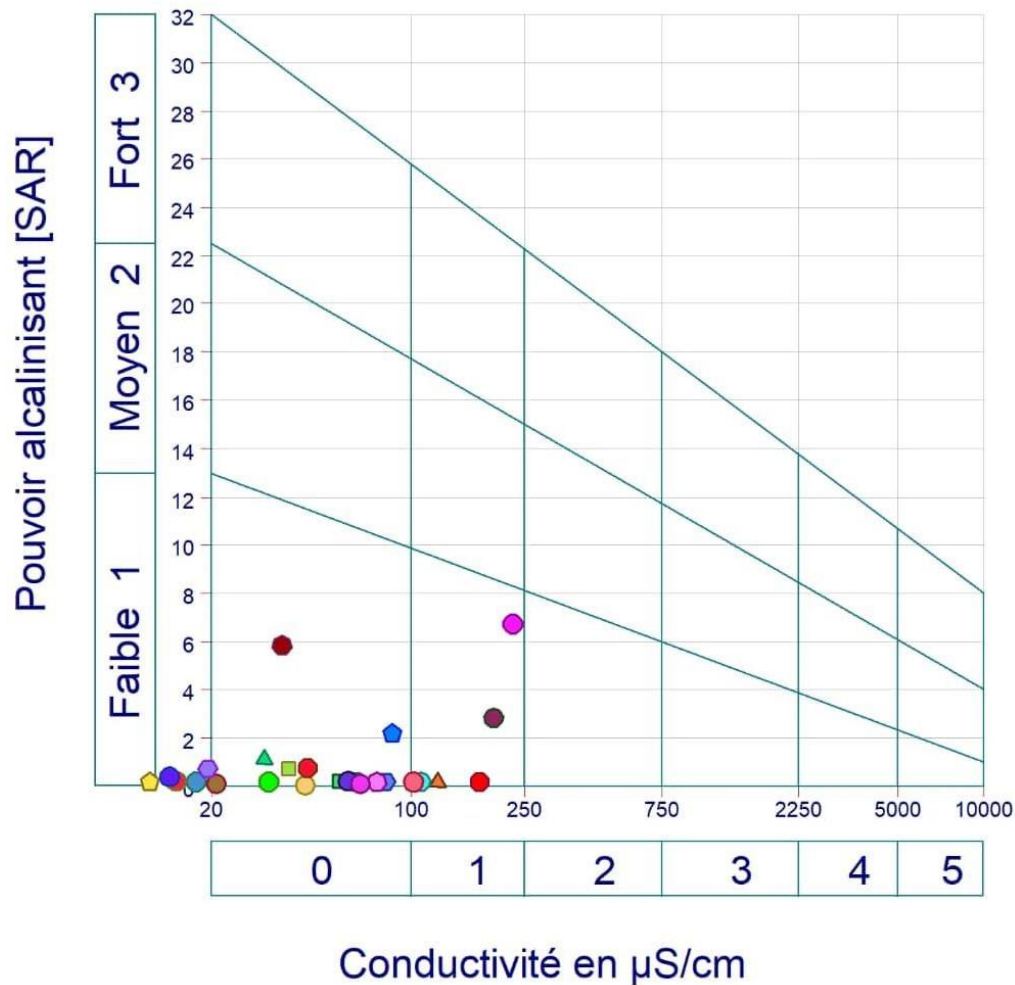


Figure 19: Diagramme de Riverside du BVS

III.7.2.2. Classification des eaux par le digramme de Wilcox (1955)

Ce diagramme est basé sur la conductivité électrique et la teneur en sodium (en $\mu\text{eq}/\text{l}$) exprimées en pourcentage ($\% \text{Na}^+ = [(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+)] \times 100$) en rapport avec l'usage agricole (Gouaidia, 2008). La classification des eaux à partir de ce diagramme révèle que ces eaux appartiennent à la classe excellente et sont de ce fait propices à toutes sortes de cultures. (Figure 20).

En résumé, les eaux du bassin versant du Sao sont convenables à l'agriculture car elles sont caractérisées par une faible minéralisation ainsi qu'un faible pouvoir alcalin. Ces résultats se rapprochent de ceux de Ndzengue (2021) dans les eaux souterraines de Mbalngong.

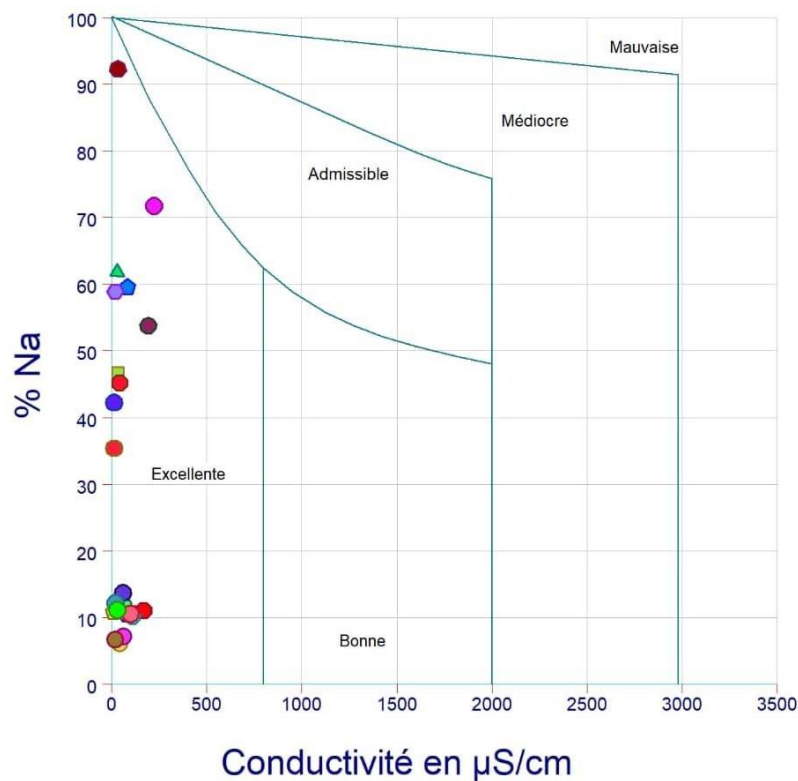


Figure 20: Diagramme de Wilcox du BVS

Conclusion

La présentation qui vient d'être faite c'est basé sur les résultats obtenus dans la recherche de caractérisation hydrogéochimique des eaux du bassin versant du Sao. Les différents types d'eaux ont été examinées, il a ainsi été présenté tour à tour : les paramètres physiographiques du dit bassin et la variation des paramètres chimiques des eaux du secteur étudié. Une présentation bien détaillée nous permet de mieux aborder notre travail. Cette analyse fera l'objet du chapitre suivant.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Situé dans le département du Ndé (Ouest-Cameroun), le bassin versant du Sao s'étend entre les latitudes 5°7'00''N et 5°10'00''N et les longitudes 10°28'30''E et 10°31'30''E. Il fait partie intégrante du bassin du Ngam.

Pour évaluer la qualité de l'eau dans ce bassin, la méthodologie utilisée porte sur la recherche bibliographique, les travaux de terrain (identification et choix des ouvrages hydrauliques les plus utilisés, prélèvements d'échantillons d'eau, mesures des paramètres physiques) et les travaux de laboratoire (dosage des cations et anions majeurs, traitement des données). Ces travaux ont abouti aux principaux résultats suivants :

Sur le plan physique, le bassin versant du Sao couvre une superficie de 24,35 km² pour un périmètre de 26,88 km. Il présente un coefficient de Gravelius de 1,54, un rapport d'allongement de 0,67 et un facteur de forme de 0,18 ce qui lui confère une forme allongée. Le rapport de confluence est 3 et 4 a une valeur moyenne de 3,5 traduisant un réseau hydrographique de type "chêne" caractérisé par une ramification bien développée avec notamment un espacement régulier des confluences. La valeur de la densité de drainage est 1,17 Km/Km², cette faible valeur de densité de drainage serait due au caractère accidenté du relief. Le coefficient de torrencialité est 0,57 et la pente moyenne du cours d'eau est 49,52. Le bilan hydrologique réalisé durant la période allant 1951 à 2021 révèle à partir d'une précipitation moyenne interannuelle de 1317 mm, une évapotranspiration de l'ordre de 780,67 mm, un ruissellement de 375,34 mm et une infiltration de 160,99 mm.

Du point de vue physico-chimique, les eaux du bassin versant du Sao sont acides à basique ($5,75 \leq \text{pH} \leq 8,85$). L'acidité de ces eaux serait liée non seulement au type de sols traversé dans la région mais aussi à la présence des acides provenant de la décomposition de la matière organique tandis que la tendance basique pourrait s'expliquer par le rejet dans ces eaux des produits chargés en ions OH⁻ provenant des eaux savonneuses et des détergents issus des lessives, du nettoyage des véhicules et de la vaisselle. Ces eaux présentent des conductivités électriques qui varient 12,2 et 225,5 µS/cm traduisant leur caractère faiblement minéralisé à peu accentué. Les faciès chimiques des eaux du BVS sont dominées par les faciès de type chloruré magnésique (52%), chloruré sodique (36%) et chloruré calcique (12%). Les sources de minéralisation des eaux du BVS sont généralement de trois types : hydrolyse des minéraux silicatés et activité volcanique (pour les ions K⁺, Ca²⁺, Na⁺, NH₄⁺, Mg²⁺ et le SO₄²⁻), origine anthropique (pour les ions NO₃⁻ et Cl⁻) et d'origine mixte (géogénique, atmosphérique, biogénique et anthropique). L'indice IQE au cours de la période d'étude à montrer une excellente qualité des eaux du BVS sur le plan physico-chimique. Le faible pouvoir alcalinisant (SAR) permet d'utiliser les eaux de la zone en irrigation pour tout

type de culture. Le développement de l'agriculture, la poussée démographique et le lessivage des sols accroissent la détérioration de la qualité des eaux de surfaces et souterraines. La réduction de ces sources de pollutions afin de préserver les ressources en eaux et d'améliorer la qualité des eaux du bassin versant doit être prioritaire.

Pour la continuité de ce travail, il serait nécessaire :

- d'intégrer d'autres paramètres complémentaires tels que les paramètres microbiologiques en plus des paramètres physico-chimiques et des métaux lourds pour le calcul de l'indice IQE ;
- d'effectuer les prélèvements des eaux sur un cycle hydrologique complet intégrant les deux saisons sèches et les deux saisons de pluies afin de mieux appréhender le fonctionnement hydro-biogéochimique des eaux souterraines
- d'élargir le champ de recherche aux études hydro-climatologiques et hydrodynamiques pour une évaluation quantitative des ressources en eaux du BVS.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdelghani, T., Aldbellah, E.H., Hajar, H., Habiba, O. (2020).** Calcul de l'indice de qualité des eaux (IQE) pour l'évolution de la qualité physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (NE, Maroc). *European Scientific Journal*, Vol 16, n°2, pp 1857-7881.
- Anaba Onana, B. A., (2017) :** Caractérisation hydrodynamique et analyse de la productivité des aquifères de fissures et de fractures du socle cristallin : cas de la région de Centre cameroun. Thèse de Doctorat/PhD, Université de Yaoundé 1, 227 p.
- Bagnols F., Gaussen H., 1957.** Les climats biologiques et leur classification. In: *Annales de Géographie*, t. 66, n°355, pp. 193-220.
- 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.
- Bon, A. F., Ndam Ngoupayou, J. R., Ewodo Mboudou, G., and Ekodeck, G. E., 2016,** Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun : *Revue des sciences de l'eau*, p. 149 - 166.
- Bon, A. F., Ombolo, A., Ewodo Mboudou, G., Ndam Ngoupayou, J. R., et Ekodeck, G. E., 2016,** Estimation of Hydraulic Conductivity of Soils at a Watershed-Scale Using Porchet's Method: Application in the Olezoa Waterhed, Yaounde, Cameroon: *International Journal of Geosciences*, p. 397 - 408.
- Bradaï, A., Douaoui A., Marlet S. 2008.** Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risque de dégradation des sols dans la plaine de Bas-Cheliff, Algérie. *Mosterganem, Algerie*. p5.
- Braun J. J., Ndam Ngoupayou J. R., Viers J., Dupre B., Bedimo Bedimo J. P., Boeglin J. L., Robain H., Nyeck B., Freydier R., Sigha Nkamdjou L., Rouiller J., Muller J. P., 2005.** Present weathering rates in humid tropical wathershed : Nsimi, south Cameroon. *Geochimica Cosmochimica. Acta*, Vol. 69, n° 2, pp 357-387.
- Brown, R. M., McClellan, N. I., Deininger, R. A., Tozer, R. G., (1972):** A water quality index-do we dare? *Water Sew Works* 117 :339–343.
- Djeuda, T. H. B., et Tanawa, E., (1999) :** Qualité de l'eau et normes en relation avec les usages dans les pays en voie de développement. Communication présentée à la 6ème

semaine nationale de l'eau organisée par le Ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie, Yaoundé, du 15 au 22 mars 1999, 14 p.

Djeuda, T. H. B., Tanawa, E., et Ngnikam, E., (2001) : Approvisionnement en eau potable. Tome 1 L'eau au Cameroun. Yaoundé, Laboratoire Environnement et Sciences de l'Eau de l'École Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé I. Presses Universitaires.

Everitt, B. S. and Horthorn T., 2011. An Introduction to Applied Multivariate Analysis with R. Springer, New York, ISBN 978-1-4419-9649-7.

Feumba, R., (2015) : Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besséké (Douala-Cameroun). Thèse de Doctorat, Université de Yaoundé I.

Feumba, R., Kemgang, D. T., Tabué, Y. J. G., Mvondo, V. Y. E., Tchaptchet, T. D. I., Ngatcha, N.B. (2021). Assessment of hydraulic parameters and protection zones of catchment aquifers for water supply network in Ndé division, West-Cameroon (Central Africa). Journal of Water Resource and Protection. Vol 13, pp 478-497.

Glèlè, Kakai R., Salako V. K., Padonou E. A., Lykke M., 2016. Methods statistiques multivariées utilisées en écologie. Annales des Sciences Agronomiques 20-spécial Projet Undersert-UE :139-157.

Gouaidia, L., 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de meskiana nord-est algerien. Th. Doc. Ph.D. Fac. Sci. Univ. Badji Mokhtar-Annaba, 135p

Guler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., Turner, K. A., (2002): Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. Hydrogeology Journal, 10 455-477.

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins ; hydropysical approach to quantitative morphology. Geological society of America bulletin. Vol 56, n°3, pp 275-370.

Horton, R.E. (1932). Drainage basin characteristics. Trans Am Geophys Union. Vol 13, n°1, pp 350-361

Illias, A., Adbou, B. M. S., Sandao, I., Issa, M. S. S., Ousmane, B. (2019). Caractérisation hydrogéochimique des aquifères du bassin Timia (Massif de l'Air Nord du Niger). European Scientific Journal. Vol 15, n°30, pp 301.

Jagadeesha M. K., Renuka, P.T. J. (2016). Morphometric studies on part North Pennar basin using remote sensing and geographic information system techniques.

Jun, X., Zhang-Dong, J., Hu, D., Jin, W., Fei, Z. (2012). Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim river basin in the extreme aride region, NW Tibetan Plateau. Journal of Asian Sciences. Vol 54-55, pp 162-173.

- Kouedjou, I. L., Anaba, B. R. C. (2021).** Analyse morphométrique du bassin versant de la Menoua pour une meilleure gestion des risques morpho hydrologiques. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, pp 2429-5396.
- Kuitcha, D., Fouépé Takounjou, Al., Ndjama, J., Takem, E. G., Tita, A. M., and Kamgang Kabeyene BV., (2013):** Chemical and isotopic signal of precipitation in Yaounde-Cameroon. *Archives of Applied Science Research*, 4 (6) : 2591-2597.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., (2015) :** Le modèle conceptuel hydrogéologique des aquifères de socle altéré et ses applications pratiques. In Actes de la Conférences « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles ». 20^e Journées techniques du Comité techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. 11-13 juin 2015, Auditorium ICES, La Roche-sur Yon, Vendée, France, 11p.
- Mangoua, T. A. D., (2021) :** Qualité des eaux dans le bassin versant d'Olezoa à Yaoundé (Centre-Cameroun). Mém. Master, Université de Yaoundé I, 70 p
- Marc, M., Thébé, B., L'hote, Y. 1999.** Acquisition et constitution d'une information hydrologique de base. Office fédérale de l'éducation et de la science suisse n°96.01
- Meybeck, M., (1986):** Global chemistry weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. Journ. Sci.*, 287, 401-428.
- Mfonka, Z., Kpoumie, A. C., Ngouh, A. N., Ndam, N. J. R., (2020):** Groundwater quality assessment under the arid climate zone in the Central Africa: case study of the South-West of N'Djamena. *Journal of Water Resource and Protection*, 13 (2) : 112-138.
- Mfonka, Z., Ndam, N. J. R., Ndjigui, P. D., Zammouri, M., Kpoumie, A., Rasolomanana, E., (2015) :** Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(4) : 2200-2218.
- Miller, V.C. A. (1953).** Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee. Technical report, 3, Department of Geology, Columbia University, New York.
- MINEE-GWP., (2009) :** Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau : Etat des lieux du secteur de l'eau au Cameroun. 213p.
- Mounchikpou, N. A., (2021) :** Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de consommation du périmètre urbain de Koutaba. Mémoire de Master, UY1. 67p
- Mounpkoundap, D., (2017) :** Influence de la lithologie et des activités anthropiques sur la qualité des eaux de la localité de MALANTOUEN (Ouest-Cameroun). Mém. Master, Univ. Ydé I. 94p.

- Nambi, H., Chandra, B. R. U., Venkata, R. V., Venkateswarulu, N. (2015).** Morphometric Analysis of Penna sub-basin in Nellore District using RS and GIS. *International Journal of Advanced Research*, Volume 3, n°12, pp 893 – 901
- Ndam, N. J. R., (1997) :** Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga (Sud-Cameroun). Thèse Université de Paris VI, 214 p., 2 annexes.
- Ndam, N. J. R., Bon, A., Ewodo, M. G., Ngouh, A. N., Ekodeck, G. E., (2019):** Hydrogeological Characteristics of Shallow Hard rock aquifers in Yaoundé (Cameroon, Central Africa). In Intech open, the world's leading publisher of open access books. 17p.
- Ndam, N. J. R., Dzana, J. G., Kpoumie, A., Tanwi, G. R., Fouepe, T. 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*. 26.
- Ndonda, E, B, V., (2020):** caractérisation hydro-chimique des eaux de Mbalmayo. Mém. Master, Université de Yaoundé 1.
- Ngouh, A. N., Kpoumie, A., Elame, N. G., Lebga, K, A., Ndjeng, E., Ndam, N. J. R. 2020 :** caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun). *European scientific journal*. Vol 16 n°15 pp 281
- Nguefack, S, C, V., Ndjouenkeu, R., Ngassoum, M, B. (2018).** Qualité de l'eau de la localité de Dschang et impact sur la santé des consommateurs. *Afrique science*. Vol 14 n°3 pp 96-107
- Nsangou, D., (2017) :** Etude de la vulnérabilité des ressources en eau du bassin versant du Mfu sur le Plateau Bamoun (Ouest Cameroun). Mém. Master, Université de Yaoundé I, 72p.
- Ntep, F., Kengne I. M., Ewodo Mboudou G., Nyochembeng N., Ekodeck G. E., (2014).** Influence of seasonal dynamics on groundwater resources quality in semitropical urban zone : case of the Biyéme upper stream catchment (Yaoundé, Cameroun). *International Journal of Biological and. Chemical. Sciences*, 8(3) : 1319-1335.
- Nzeket, A. B., Moyo, K. B., Aboubakar, A., Youdoum, Y. A. S., Moussima, Y. D. A., Zing Zing, B., (2019):** Assessment of Physico chemical and Heavy Metal Properties of Groundwater in Edéa (Cameroon). *American Journal of Water Resources* 7 (1): 1-1.
- Omar, R., Imane K., Fatiha K., Hamid C., karima E., Abdalsalam I., Mostafa F., Youssef S., Khadija K., Driss B., 2014. Physico -Chemical Evaluation of Urban wastewater of the Town of Sidi Kacem. *computational Water, Energy, and environmental Engineering*, 3: 30-35.**
- OMS., (2017) :** Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4e éd. Intégrant le premier additif. 539 p.

- Piper, A. M., (1994):** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses.
- Primus, A. T., Nono, K.D. G., Wotchoko, P., Mbezele, T. B., Djoukam, T. J. F., Kamgang, K. B. V., Bitom, D. (2020).** Geochemistry of the lateritic mantle developed on the Basalt in Cameroon western highlands (Cameroon Volcanic Line). *Geoderma*. Vol 376, pp 114569.
- Schumm.** (1956). Evolution of drainage systems and slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Natl Geol Soc Am Bull* **67**, pp 597-646.
- Strahler, A. N. (1964).** Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In: Chow VT (ed.) *Handbook of applied hydrology*. McGraw Hill Book Co., New York, pp 4-76.
- Suchel, J. B. (1972).** La répartition des pluies et les régions pluviométriques au Cameroun. Contribution à l'étude des climats de l'Afrique tropicale. MESIRES ORSTOM, yaoundé, 260p.
- Taghuo, T. F. P., 2017.** Contribution à l'étude physico-chimique et biologique des eaux du Nyong à Olama (Centre Cameroun). Mém. Master II, Université de Yaoundé I, 77p.
- Tatou, R. D., Kamgang, K. V. (2023).** Use hydrochemistry and environment isotopes for the assessment mineralization of groundwater Miopliocene acquifer in Douala 3 (Cameroon). *American Journal of Water Resources*, Vol 11, n°1, pp 11-19.
- Tchouankoue, J. P., Li, X. H. Ngo belnoum, R. N., Mouafo, L. Ferreira, V.P. (2016).** Timing and Tectonic implications of the Pan-African Bangangte syenomonzonite, West Cameroon : constraints form in-situ Zircon U-Pb age and Hf-O isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 94-103.
- Tchouankoue, J. P., Simeni Wambo, N. A., Kagou Dongmo, A. Li, X. H. (2014).** ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of Basalt Dyke Swarn in Western Cameroon Evidence of late Paleozoic and Mesozoic Mgmatism in the corridor of the Cameroon line. *Journal of African Earth Sciences*, 93, 14- 22.
- Tchouankoue, J. P., Simeni Wambo, N. A., Kagou Dongmo, A. Wörner, G. (2012).** Petrology Geochemistry and Geodynamic implication of Basalt Dyke swarms from the Southern continent pert of the Cameroon Volcanic line, Central Africa. *The Open Geology Journal*, 6, 72-84.
- Thorntwaite, C. W. (1948).** An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*. Vol 38, n°1, pp 55-94.
- Tuekam, RP., Nyamsi Tchactcho, NL., Noah Ewoti, V., Chinche, SB., Nziéleu, JG., Poutougnigni, OF., Zébazé SH. 2021** physicochemical characterization dynamics abundance bactériological and aquatic faune of groundwater in the city

of Mbalmayo (Cameroon). Journal of biodiversity and environment science. Vol. 13.No.2. p. 1-15

Wambo, S. N. A., Tchatchet, T. D., Ngo belnoum, R. N., Tchouankoue, J. P., Ganwa, A. A. (2017). Tructural relationship between deformation and Paleozoic to Mesozoic Basalt dykes in the Precambrian basement of the Southen continental part of the Cameroon volcanic line. International journal of science. 8, pp 318-331.

Wotchoko, P., Tene Djoukam, J. F., Kouankap Nono, G. D., Kouske, P. A., Kouatchio, D. G. M., Atemkia Fonkem, S. (2015). Petrographic and Geochemical carактерization of Basalt in Bangangte area (West Cameroun): implication on their source. Earth sciences. Vol 4, n° 6, pp 266-274.

Yassir, M. E., Amira A. A., 2013. Bacterial contamination of drinking water in the internally displaced People Camps in south Darfur, Sudan Computational water, Energy, and environmental engineering, 2: 10-12.