

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

* * * * *

FACULTE DES SCIENCES

* * * * *

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES, TECHNOLOGIES ET
GEOSCIENCES

* * * * *



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

* * * * *

FACULTY OF SCIENCE

* * * * *

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY, AND
GEOSCIENCES

* * * * *

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EART SCIENCE

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIAL FORMATIONS

**CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE ET HYDROCHIMIQUE D'UN
AQUIFERE EN ZONE DE SOCLE FISSURE ET ALTERE : CAS DU BASSIN
VERSANT DE BIDOU A NGAOUNDERE III EME (ADAMAOUA-CAMEROUN)**

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

Spécialité : Géosciences des Formations Superficielles

Option : Sol, Eau et Sciences Géotechniques

Présenté par

KABAO BANDJI Flora

Matricule : 09Q0614

Licencié ès-Sciences



Sous la direction de :

NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy

Professeur

Université de Yaoundé I

Année académique 2023-2024

DEDICACE

A mes parents M et Mme BANDJI.

REMERCIEMENTS

Le présent travail est l'œuvre de la collaboration de plus d'une personne. De ce fait qu'il me soit permis de remercier :

Le Dieu tout puissant qui m'a donné les forces et les moyens de produire ce travail ;

J'adresse ma profonde gratitude au **Pr NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy** qui, malgré ses multiples occupations, a guidé mes premiers pas dans la recherche en acceptant de diriger ce travail. Il a stimulé en moi le sens de la recherche et l'ardeur au travail.

J'adresse ma gratitude **Dr FOUEPE TAKOUNJOU Alain Leopold**, Directeur de Recherche au CRECC pour son orientation, sa disponibilité, son attention, ses conseils, son soutien et surtout ses encouragements qui m'ont permis de rédiger ce mémoire.

Au Professeur **BISSO Dieudonné**, chef de département des Sciences de la Terre, pour la bonne marche dudit Département. Je lui témoigne par cette occasion ma profonde considération.

Tous mes sincères remerciements au projet **PROSEC** (Projet Sol, Eau, Climat), son chef de projet Mme **Julia PRENZEL** ; au **Dr FANTONG Wilson** (point focal de l'IRGM pour le projet), pour l'accompagnement, le soutien et la disponibilité accordés à ce travail et à mon endroit tout au long de cette année académique.

J'exprime toute ma gratitude aux enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour leurs efforts constants dans la formation des étudiants.

Toute ma gratitude et remerciements vont à l'endroit de M **NJIAYOUOM NGAH Mohamed** pour ses conseils et apports continus.

Je remercie de tout cœur toute l'équipe **PROSEC** ayant participé à la campagne de terrain, pour leur disponibilité, leurs critiques et suggestions. Je pense au, **Dr Nelly MONTCOUDIOL**, **Dr Simon DJAKBA BASGA**, **Dr Daouda NSANGOU**, **Dr Yaya FODOUE**, **Mme Laila SEEHAUSEN**, **Zachée BASSOGOG**, **Alex TADJUIDJE Jean Calvin**, **ABDOULAYE Sali**, **NEMBA Roger Roland**.

Je remercie mes camarades de promotion pour tous les moments de gaieté passés ensemble ;

Je remercie mes sœurs et frères **Stella, Ghislaine, Daniel, Daniella, Marie Reine, Aristide, Romuald** ; mes Amis en particulier ceux du **Panel**, ceux-là qui me donnent le sourire quand tout va mal.

J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire et dont les noms n'ont malheureusement pas été mentionnés, recevez ici la ferme assurance que vos services ne seront jamais oubliés.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ABREVIATIONS	xi
RESUME.....	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA ZONE D’ETUDE ET TRAVAUX	
ANTERIEURS COMPLEMENTAIRES.....	4
INTRODUCTION	4
I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN	4
I.1.1. Situation géographique et administrative	4
I.1.2 Climat	4
I.1.3 Végétation.....	6
I.1.4 Orohydrographie.....	7
I.1.5 Géologie.....	8
I.1.6. Population et activités socio-économiques	10
I.2 QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS	11
CONCLUSION	11
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	12
INTRODUCTION	12
II.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE ET CARTOGRAPHIQUE	12
II.2. TRAVAUX DE TERRAIN	12
II.2.1 Reconnaissance et localisation du site d’étude.....	12
II.2.2 Choix et description des points suivis et prélevés	13
II.2.3. Mesure des niveaux d’eau souterraine	14
II.2.4. Essai in situ de la perméabilité par la méthode Porchet (1931)	16
II.2.5. Essai de pompage	17
II.2.6. Mesure in situ des paramètres physico-chimiques des eaux	17

II.3. TRAVAUX DE LABORATOIRE.....	18
II.3.1. Caractérisation physiographique du bassin versant de Bidou	18
II.3.2. Détermination des paramètres chimiques	20
II.3.3. Détermination de la perméabilité à saturation.....	20
II.3.4. Elaboration des cartes piézométriques	21
II.3.5. Méthodes d'interprétation des données d'essais de pompage.....	21
II.3.6. Analyse hydrochimique.....	22
II.3.7. Analyse statistique.....	22
II.4. ELABORATION DU MODELE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT	
HYDROGEOLOGIQUE BASSIN VERSANT DU BIDOU	23
II.4.1. Définition et objectif d'un modèle	23
II.4.2. Type de modèles.....	23
II.4.3. Etapes de la modélisation	23
CONCLUSION	25
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	26
INTRODUCTION	26
III.1 CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET HYDROGRAPHIQUES DU	
BASSIN VERSANT DE BIDOU.....	26
III.1.1 Caractéristiques morphométriques.....	26
III.1.2. Caractéristiques hydrographiques	26
III.2. PARAMETRES HYDRAULIQUES DES AQUIFERES DE FISSURES DU BASSIN	
VERSANT DE BIDOU	28
III.3. NATURE ET CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DU RESERVOIR	
ALTERITIQUE	32
III.3.1. Nature du réservoir altéritique	32
III.3.2. Conductivité hydraulique	32
III.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE.....	33
III.4.1. Piézométrie	33
III.4.2. Cartes piézométriques	34
III.5. CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUES	36
III.5.1. Paramètres physiques.....	36
III.5.2. Paramètres chimiques	37
III.5.3. Corrélations entre les éléments chimiques et l'origine des éléments dissous dans les eaux souterraines de la zone d'étude	47

III.6. MODELE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE BIDOU.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	53
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55
ANNEXES.....	i

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique et administrative de la zone d'étude.	5
Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) pour la période allant de 1981-2022	6
Figure 3 : Morphologie de la commune de Ngaoundéré III.....	7
Figure 4 : Carte hydrographique de la zone d'étude.	8
Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude	10
Figure 6 : Localisation géographique du bassin versant de Bidou à Ngaoundéré.	13
Figure 7 : Carte d'échantillonnage (à gauche) et ouvrages suivis (à droite) dans le BVB	15
Figure 8 : Présentation en (a) des datas loggers pour enregistrement automatique ; en (b) de la sonde piézométrique lumineuse pour enregistrement manuel ; en (c) de la tarière manuelle et en (d) d'un trou de tarière.....	17
Figure 9 : Etapes de développement d'un modèle	25
Figure 10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Bidou.....	27
Figure 11 : Oro-hydrographie du bassin versant de Bidou	28
Figure 12 : Analyse graphique de l'essai de pompage de Maiborno par la méthode de Neuman	29
Figure 13 : Analyse graphique de l'essai de pompage de Gada Bidou par la méthode de Neuman	30
Figure 14 : Analyse graphique de l'essai de pompage de Malang par la méthode de Neuman	31
Figure 15 : Distribution de la valeur de Ks dans le bassin versant de la rivière Bidou.....	33
Figure 16 : Logs de forage dans la zone d'étude (Fouépé Takounjou et al., (2022)).....	34
Figure 17 : Carte piézométrique minimale de l'aquifère (Mars 2021) à gauche et carte piézométrique maximale de l'aquifère (août 2021) à droite.	35
Figure 18 : Carte de fluctuation piézométrique.....	36
Figure 19 : Fiabilité de la technique d'analyse des échantillons d'eau mesurée par équilibre de charge entre la somme des cations et les anions.	39
Figure 20 : Variation spatiale des paramètres chimiques.....	42
Figure 21 : Répartition spatiale des éléments chimiques dans l'ensemble des eaux du BVB..	44
Figure 22 : Diagramme de Piper des eaux de forage.	45
Figure 23 : Diagramme de Piper des eaux de puits.....	46
Figure 24 : Diagramme de Piper des eaux de surface.	47
Figure 25 : Relation cote topographique et Niveau piézométrique.....	51

Figure 26 : Modèle 3D de l'aquifère d'altérite du bassin versant de Bidou	52
---	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Précipitations, températures et indices d'aridité moyens mensuels du bassin versant de Bidou (1981–2022).	5
Tableau 2 : Points d'échantillonnage et leurs coordonnées	14
Tableau 3 : Paramètres physiographiques du bassin versant de Bidou.....	27
Tableau 4 : Eléments caractéristiques de l'hypsométrie du bassin versant.....	27
Tableau 5 : Résultats des tests d'infiltration effectués dans le bassin versant du Bidou	32
Tableau 6 : Variations statistiques des paramètres physiques.....	37
Tableau 7 : Variation statistique des paramètres chimiques (ions majeurs)	40
Tableau 8 : Variation statistique des paramètres chimiques (éléments traces).	40
Tableau 9 : Norme d'OMS des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.....	43
Tableau 10 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du bassin versant de Bidou.....	49

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AEP : Adduction en Eau Potable

AFD : Agence Française de Développement

ANOR : Agence des Normes et de la Qualité du Cameroun

BI : Balance Ionique

BGR : *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (Institut Fédéral des Géosciences et des ressources Naturelles)

BUCREP : Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population

BV : Bassin Versant

BVB : Bassin Versant de Bidou

CAMWATER : Cameroon Water utilities

CRECC : Centre de Recherche sur l'Environnement et les Changements Climatique

GPS : Global Positionning System

GWP : Global Water Partnership

MINEE : Ministère de l'Eau et de l'Energie

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PCD : Plan Communal de Développement.

ProSEP : Projet Sol, Eau et Plante

RESUME

L'eau souterraine constitue le principal mode d'approvisionnement en eau potable (AEP) des populations d'Afrique subsaharienne. Cette règle s'applique à la commune de Ngaoundéré 3^{ème} au Cameroun au regard des risques de contamination, que constitue l'eau de surface. Toute fois le site de la présente étude qui n'est autre que le bassin versant de Bidou situé dans la commune d'arrondissement de Ngaoundéré 3^{ème} (plateau de l'Adamaoua), connaît un développement très rapide accompagné d'une croissance importante de la population ; ce qui nécessite d'énormes quantités d'eau pour différents secteurs d'activité (AEP, industrielle et agricole). L'objectif principal de cette étude est de caractériser le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des aquifères d'altérites et de fissures en zone de socle du bassin versant de Bidou. L'approche méthodologique a consisté : à la recherche bibliographique, aux investigations sur le terrain (suivis piézométriques, essais de pompage, prélèvements et conditionnements des échantillons d'eau souterraine, mesure des paramètres physicochimiques) et, en laboratoire (analyses des paramètres physico-chimiques et chimiques), et enfin à l'interprétation des différents résultats obtenus à partir des SIG et les méthodes hydro-chimiques classiques et statistiques.

Les résultats obtenus montrent que : sur le plan hydrodynamique, la conductivité hydraulique verticale saturée varie entre 3×10^{-6} et 6×10^{-5} m/s (sol argileux-limoneux à argilo-sableux), les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de 3.38×10^{-1} à $47.6 \text{ m}^2/\text{jour}$ (ces valeurs correspondent à un potentiel d'eau souterraine limité à modéré). Les niveaux statiques sont compris entre 4,3 et 18,3 m de profondeur avec des niveaux piézométriques qui varient entre 1072,39 et 1362,12 m. Les fluctuations varient quant à eux entre 0,3 et 6,5 m et en fonction de versants. L'analyse des cartes piézométriques montre principalement un écoulement souterrain convergent (du nord vers le sud). Les zones situées à l'est et au sud (lac Dang) du site d'étude constituent une dépression piézométrique, tandis que celle localisées vers le sud-est correspond à un dôme piézométrique et donc propice à l'implantation des autres ouvrages. Sur le plan qualitatif, ces eaux sont dans l'ensemble acides à légèrement basiques ($5,20 \leq \text{pH} \leq 7,60$), avec des minéralisations faibles à excessives ($9 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{CE} \leq 160 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$). Quatre types de faciès hydrochimiques sont observés : un faciès bicarbonaté calcique et magnésien représentant (87 %) des échantillons analysés et un faciès chloruré sodique et potassique (7 %), un faciès bicarbonaté calcique et un faciès bicarbonaté sodique et potassique ; ces deux derniers types sont représentés respectivement au niveau des ouvrages P4 et F5. L'étude hydrochimique des eaux du BVB montre que la répartition spatiale des éléments chimiques est fortement liée à la lithologie, suite à l'hydrolyse des minéraux primaires ; mais aussi à l'action de l'homme sur son environnement. L'analyse des ions majeurs présente des teneurs qui sont pour la plupart très inférieures aux normes prescrite par l'OMS. A partir de la classification des eaux d'irrigation, on distingue que ces eaux ne présentent aucun danger pour l'irrigation car elles sont à alcalinité faible et leur salinité est moyenne à élevée. Ces résultats ont permis d'établir un modèle conceptuel des eaux souterraines du bassin versant de Bidou.

Mots clés : eaux souterraines, hydrodynamique, hydrochimie, aquifère, hydrogéologie, plateau de l'Adamaoua.

ABSTRACT

Groundwater is the main source of drinking water for inhabitants in sub-Saharan Africa. This role applies to the community of Ngaoundéré III in Cameroon. In view of the risks of contamination, groundwater has taken advantage of surface water which is the preferred source of drinking water supply. However, the site of the present study, which is none other than the Bidou watershed located in Ngaoundéré III municipality (Adamawa plateau), is experiencing a very rapid development accompanied by significant growth in population; which requires huge quantities of water for different sectors of activity (water supply, industrial and agricultural). The main objective of this study is to characterize the hydrodynamic and hydrochemical functioning of the alterite and fissure aquifers of the volcanic basement in the Bidou watershed. The methodological approach consisted of bibliographic research, field investigations (piezometric monitoring, pumping tests, sampling and conditioning of groundwater samples, measurement of physico-chemical parameters) and, in the laboratory (analysis of physico-chemical and chemical parameters), and finally the interpretation of the various results obtained from GIS and classical and statistical hydro-chemical methods. The results obtained indicated that from a hydrodynamic point of view, the saturated vertical hydraulic conductivity varies between 3×10^{-6} and 6×10^{-5} m/s (clayey-silty to clayey-sandy soil), the transmissivity values are of the order of 3.38×10^{-1} to 47.6 m²/day (these values correspond to a limited to moderate groundwater potential). The static levels are between 4.3 and 18.3 m deep with piezometric levels that vary between 1072.39 and 1362.12 m. The fluctuations vary between 0.3 and 6.5 m and depending on the slopes. Analysis of piezometric maps mainly shows convergent groundwater flow (from north to south). The areas located to the east and south (Dang Lake) of the study site constitute a piezometric depression, while those located to the southeastern parts correspond to a piezometric dome and therefore conducive to the installation of the other structures. However, the water is generally acidic to slightly basic ($5.20 \leq \text{pH} \leq 7.60$), with low to excessive mineralization ($9 \mu\text{S/cm} \leq \text{EC} \leq 160 \mu\text{S/cm}$). Four types of hydrochemical facies are observed: calcium and magnesium bicarbonate facies representing (87%) of the samples analyzed and a sodium and potassium chloride facies (7%), calcium bicarbonate facies and sodium and potassium bicarbonate facies; these last two types are represented respectively at the level of structures P4 and F5. The hydrochemical study of the BVB water sources shows that the spatial distribution of chemical elements is strongly linked to the lithology of the aquifer, following the hydrolysis of primary minerals; but also, to the action of man on his environment. The analysis of major ions presents concentrations that are for the most part well below the standards prescribed by the WHO. From the classification of irrigation water, it can be seen that this water does not present any danger for irrigation because it is of low alkalinity and its salinity is medium to high. These results have made it possible to establish a conceptual model of groundwater in the Bidou watershed.

Keywords: groundwater, hydrodynamics, hydrochemistry, aquifer, hydrogeology, Adamawa plateau.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est la substance la plus abondante de l'écorce terrestre. Elle occupe un peu plus des 2/3 de la terre, soit environ 72 % de la surface du globe (Musy et Higy, 2003). Dans l'hydrosphère, les eaux salées occupent 96,5 % de ressources en eau et le reste des 3,5 % est représenté par les eaux douces (Banton et Bangoy, 1997). Les principales ressources en eaux douces sont constituées des eaux de surfaces et des eaux souterraines. Ces dernières constituent le principal mode d'approvisionnement en eau potable des populations d'Afrique subsaharienne (AFD, 2011). Au regard des risques de contamination, l'eau souterraine a pris l'avantage sur l'eau de surface en devenant la source privilégiée d'alimentation en eau potable et d'autres utilisations. L'eau souterraine est moins vulnérable à la pollution. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses sociétés à travers le monde et particulièrement celles en voie de développement se trouvent au centre des débats sur le développement durable des ressources en eau. Cette précieuse ressource est de plus en plus menacée actuellement par les changements globaux (activités anthropiques et variabilités et/ou changements climatiques) qui ont pour conséquence la dégradation quantitative et/ou qualitative de cette ressource naturelle.

Le Cameroun comme la plupart des pays en voie de développement n'est pas épargné par cette situation. À l'échelle nationale, les ressources en eau de surfaces et souterraines sont inégalement réparties et très souvent influencée par le climat. L'essentiel des ressources en eau souterraine du Cameroun est contenu dans les aquifères sédimentaires et la zone de socle (Sighomnou, 2004). La zone de socle représente environ 90 % du territoire national contre 10 % pour les bassins sédimentaires (MINEE et GWP-Cmr, 2009). L'exploitation non contrôlée des ressources en eau souterraine dans ces zones permet de faire face aux pénuries d'eau et aux problèmes d'alimentation en eau potable des populations. Pour tenter d'apporter un début de solution à ce problème d'accès en eau des populations, plusieurs initiatives nationales et internationales ont été entreprises par les pouvoirs publics camerounais. Ces initiatives visent à court, moyen et à long terme à améliorer l'accès à l'eau des ménages en zone urbaine, péri-urbaine et rurale.

La région de l'Adamaoua habituellement appelée « château d'eau du Cameroun » car plusieurs cours d'eau y prennent leurs sources, est confronté aux problèmes d'alimentation en eau potable des populations rurales. Dans la commune d'arrondissement de Ngaoundéré 3, le service national d'adduction d'eau par la CAMWATER couvre moins de 15 % de la commune (PCD, 2013). Cette situation a contraint le reste de la population à faire recours aux eaux de

subsurface (source et puits) et de profondeur (forage) dont les caractéristiques restent jusqu'ici peu connues.

Les travaux antérieurs menés par Kouassy (2010) dans le bassin versant de Bibakala ; Tamonkem (2014) dans les arrondissements de Ngaoundéré I, II, III et Nganha sur l'hydrodynamique et l'hydrochimie ont montré à travers des études piézométriques que le comportement hydrodynamique est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques. Du point de vue hydrochimique, ils ont révélé que les teneurs en cations et en anions des eaux souterraines et de surface sont inférieures aux normes recommandées par l'OMS sur la qualité de l'eau destinée à la consommation à l'exception des nitrates. Les travaux effectués par Foano (2020) dans le bassin versant de Bidou situé dans la commune de Ngaoundéré III révèlent que : (1) l'agriculture est favorable dans cette zone car l'infiltration varie de $0,34 < I < 5,71$ (cm/min) pour une moyenne de 1,68 (cm/min) ; (2) Le coefficient de perméabilité est compris entre $10^{-6} < K < 10^{-4}$ (m/s) correspondant à une formation peu à assez perméable et d'aquifère médiocre à assez bon ; (3) La carte de disponibilité des ressources en eau dans le Bassin versant de Bidou révèle qu'environ 49,36% de surface du Bassin versant possède les ressources en eau disponibles pour l'agriculture alors qu'environ 50,64% de surface nécessiteront l'implantation des ouvrages de captage pour avoir accès à l'eau pour l'irrigation. Les études menées par Njueya et al en 2021 et en 2022 dans la partie sud-ouest de la région de l'Adamaoua, précisément dans le Mbakaou-Tibati ont révélé que : (1) la variabilité de la structure géologique de l'aquifère se compose de plusieurs couches productives entre 2 et 74 m de profondeur ; et (2) l'interaction eau-roche est le principal processus de minéralisation des eaux souterraines, qui produit principalement des faciès bicarbonaté calcique et magnésienne et les faciès bicarbonatés sodique et potassique.

Cependant, aucune étude portant sur la caractérisation hydrodynamique et hydrochimique des aquifères n'a encore été menée dans la commune de Ngaoundéré III^{ème}, précisément dans le bassin versant de Bidou. En effet, la commune de Ngaoundéré III est une zone en pleine croissance démographique, et agricole où l'eau souterraine (puits, forages) constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations non raccordées au réseau d'eau potable traitée et gérée par la Camwater.

La création de nouvelles zones d'habitation dans la zone d'étude pousse les populations à s'intéresser de plus en plus aux ressources en eau disponibles pour divers usages. La demande croissante nécessite une forte mobilisation des quantités d'eau souterraines (risque de surexploitation de la nappe) et expose de plus en plus les nappes d'eau à la pollution. Cette

pollution pourrait découler du fait du rejet des déchets (solide et liquide) dans les points d'eau. De ce fait, le fonctionnement de l'aquifère dans le bassin reste méconnu. C'est dans ce contexte qu'une étude hydrodynamique et hydrochimique a été entreprise dans le bassin de Bidou pour contribuer à la connaissance des ressources en eau dans l'Adamaoua-Cameroun.

Elle a pour objectif principal de caractériser le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique des aquifères d'altérites et de fissures du bassin versant de Bidou. Plus spécifiquement il s'agit de :

- déterminer les caractéristiques physiographiques du bassin versant de Bidou ;
- déterminer les caractéristiques physiques et hydrodynamiques des aquifères dudit bassin ;
- évaluer la qualité physico-chimique des eaux dudit bassin d'étude ;
- proposer un modèle conceptuel du système aquifère du bassin versant de Bidou.

Les résultats permettront d'apporter un éclaircissement sur les modes de recharge des nappes, les zones d'alimentation et de circulation, la potabilité des eaux dans l'optique d'une gestion durable des ressources en eau.

Ce travail comporte trois parties encadrées par une introduction et une conclusion générale suivi de quelques perspectives :

- le premier chapitre présente les généralités sur le cadre biophysique, humain et les travaux antérieurs dans la zone d'étude ;
- le deuxième chapitre décrit les matériels et les méthodes utilisés pour atteindre les objectifs fixés ;
- le troisième chapitre enfin est réservé à la présentation, l'interprétation et la discussion des résultats.

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

INTRODUCTION

Ce chapitre présente la revue de la littérature sur le cadre biophysique et humain ainsi que les travaux antérieurs menés en hydrogéologie et hydrogéochimie dans la zone d'étude.

I.1. CADRE BIOPHYSIQUE ET HUMAIN

I.1.1. Situation géographique et administrative de la zone d'étude

La commune d'arrondissement de Ngaoundéré III (393 Km²) est située entre les latitudes 6°38'00'' et 7°53'00''N et les longitudes 12°55'15'' et 14°31'15''E. Cet arrondissement qui fait partie des huit (08) arrondissements que compte le département de la Vina est limité au nord par l'arrondissement de Mbé, au sud par l'arrondissement de Ngaoundéré I, à l'est et à l'ouest par les arrondissements de Ngaoundéré II et Martap respectivement (Figure 1).

I.1.2 Climat

La région de l'Adamaoua présente un climat tropical humide ou semi-humide d'altitude, de type soudanien (Suchel, 1988). Les données recueillies à la station de Ngaoundéré-aéroport ont permis de caractériser le climat de Ngaoundéré III et ses environs. Les paramètres pris en compte sont les précipitations et les températures.

I.1.2.1 Précipitation

La hauteur moyenne interannuelle des précipitations enregistrées durant la période comprise entre 1981 et 2022 (41 ans) est de 1554,63mm. Les mois de juillet et d'août sont les plus pluvieux et les mois de décembre et janvier sont les plus secs (Tableau 1).

I.1.2.2 Température

La température moyenne mensuelle interannuelle est de 28,55 °C pour la période allant de 1981 à 2022. Le mois le plus chaud est celui d'avril (33,4 °C) et le mois de janvier est le moins chaud (25,9 °C) (Tableau 1).

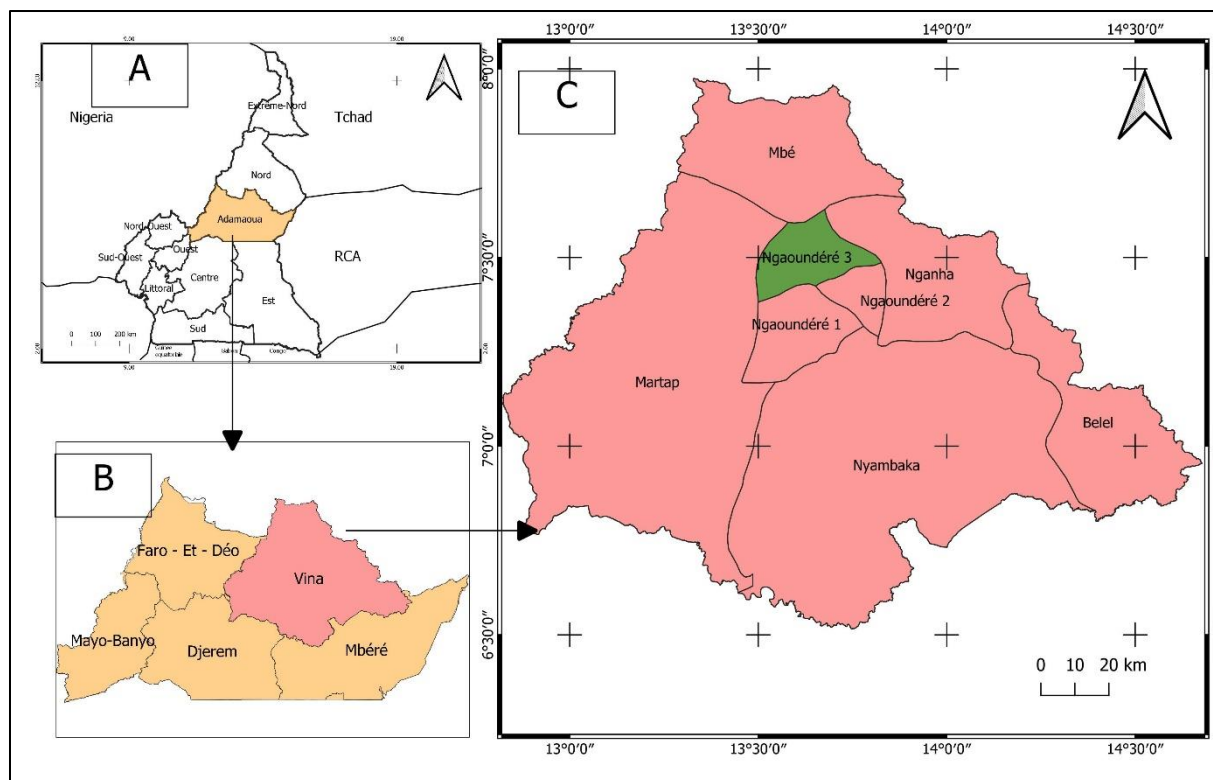


Figure 1 : Situation géographique et administrative de la zone d'étude. A) Région de l'Adamaoua dans le Cameroun ; B) Département de Vina dans l'Adamaoua-Cameroun ; C) arrondissement de Ngaoundéré III dans le département de la Vina.

Tableau 1 : Précipitations, températures et indices d'aridité moyens mensuels du bassin versant de Bidou (1981–2022).

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec	Tot.a/moya
P (mm)	0,2	1,3	36,1	120,6	206,8	222,7	272,8	277,2	270,8	141,8	4,4	0,2	1554,6
T (°C)	25,9	28,7	32,5	33,4	30,9	28,4	27,0	26,5	26,9	28,4	28,0	26,0	28,6
Ia	0,1	0,4	10,2	33,4	60,7	69,6	88,5	91,1	88,1	44,3	1,4	0,0	

P : précipitation, **T** : température, **Ia** : indice d'aridité, moy.a = moyenne Annuelle, Tot.a = total annuel

1.1.2.3 Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne (1942), noté Ia est un paramètre qui permet de séparer les mois secs des mois humides pendant une période donnée. Il est donné par la formule suivante : $Ia = 12 \times P_m / T_m + 10$ avec P_m = précipitations mensuelles interannuelles (mm) ; T_m = température moyenne mensuelle (°C) ; Ia = Indice d'aridité de De Martonne.

D'après De Martonne :

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

Pour la période allant de 1981 à 2022, les mois de Janvier, Février, Mars, Novembre, Décembre, sont considérés comme secs, les mois d'Avril et Octobre sont dit sub-sec tandis que les mois d'Avril, Mai, Juin, Juillet, Août et Septembre sont dits humides (Tableau 1).

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

Le diagramme ombrothermique est obtenu à partir des données pluviométriques et thermiques. Il permet de distinguer les mois écologiquement secs des mois écologiquement humides.

Un mois est dit sec lorsque la pluie moyenne mensuelle obtenue pendant ce mois est inférieur à la température obtenue pendant ce mois ($P < T$). D'après ce diagramme les mois de Novembre à Mars (05 mois) sont des mois secs tandis que les mois de Avril à Octobre (07 mois) sont considérés comme des mois humides (Figure 2).

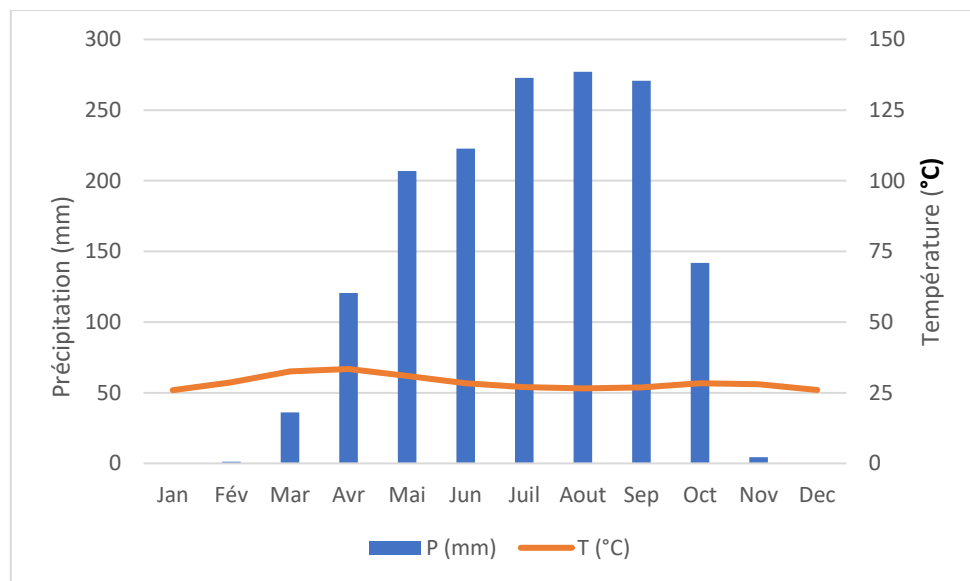


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) pour la période allant de 1981-2022 (Source : ASECNA Ngaoundéré)

I.1.3 Végétation

La végétation rencontrée dans la zone d'étude est dominée par les savanes arborées/arbustives, les galeries forestières et le massif forestier de la falaise de Ngaoundéré

(PCD, 2013). Les savanes arborées sont constituées d'arbres dispersés et d'une strate herbacée plus ou moins dense.

I.1.4 Orohydrographie

I.1.4.1. Orographie

Le relief de la zone d'étude est caractérisé par des collines, des plateaux et des plaines (PCD, 2013). On y distingue trois éléments morphologiques qui se présentent en escalier du sud vers le nord à savoir :

- la plaine de Bini- Dang – Malang d'altitudes comprises entre 1069 et 1089 m ;
- le plateau de Wouro-Soua – Béka – MOUNGUEL, encore appelé petite falaise, caractérisé par une altitude qui varie brusquement sur une petite distance entre 1128 m à Wouro Soua et 1379 m à MOUNGUEL ;
- le plateau de Tchabal d'altitude moyenne de 1388 m (Figure 3).

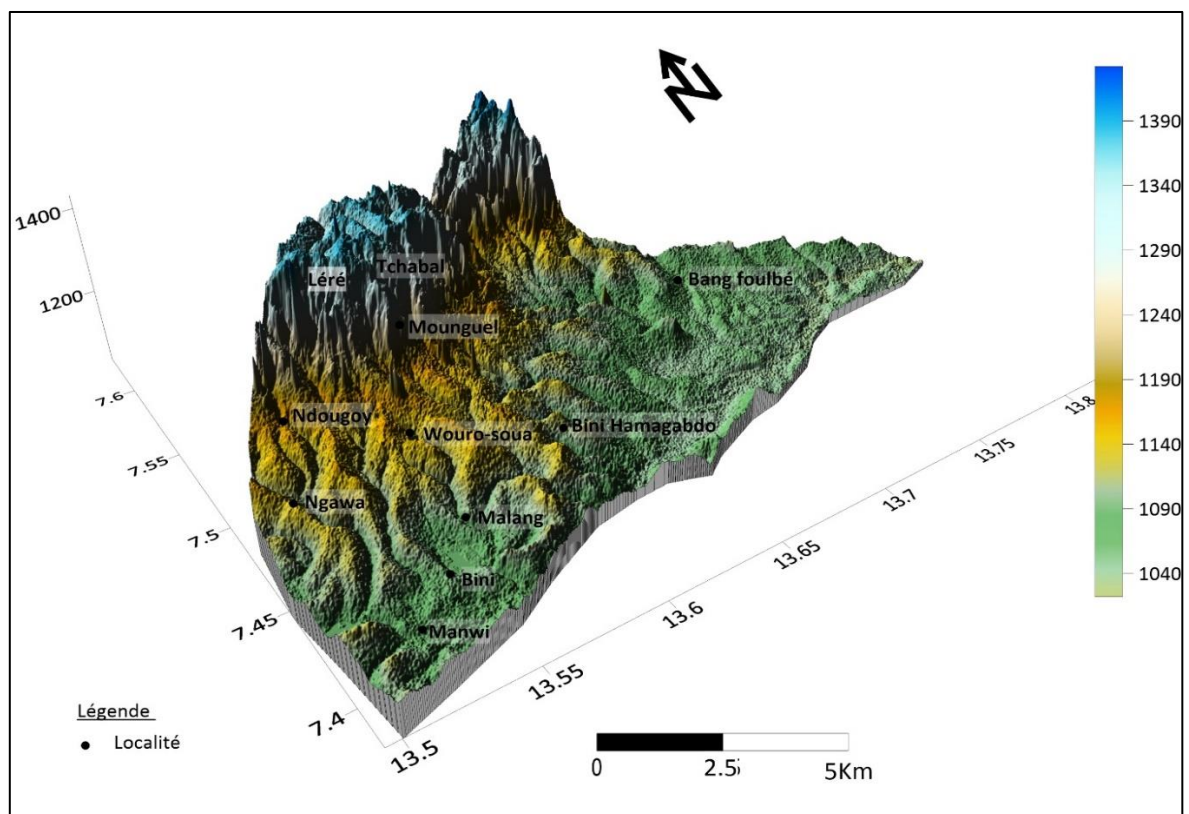


Figure 3 : Morphologie de la commune de Ngaoundéré III

I.1.4.2. Hydrographie

La zone d'étude appartient au bassin versant de Bini sous bassin du lac Tchad (partie meridionale). Elle est drainée par le cours d'eau Bini, affluent en rive droite de la Vina nord qui prend sa source dans l'Adamaoua (Figure 4). Le cours d'eau Bini s'écoule suivant la direction Sud-ouest (SW) vers Nord-Est (NE). Ses principaux affluents en rive gauche sont : Mandoran, mayanga, Bidou etc. En rive droite on y retrouve : Mbidjoro, Mabanga, Ndouan. Dans le bassin de Bini se trouve également 02 lacs à savoir : le lac Bini et lac Dang en état d'eutrophisation avancée.

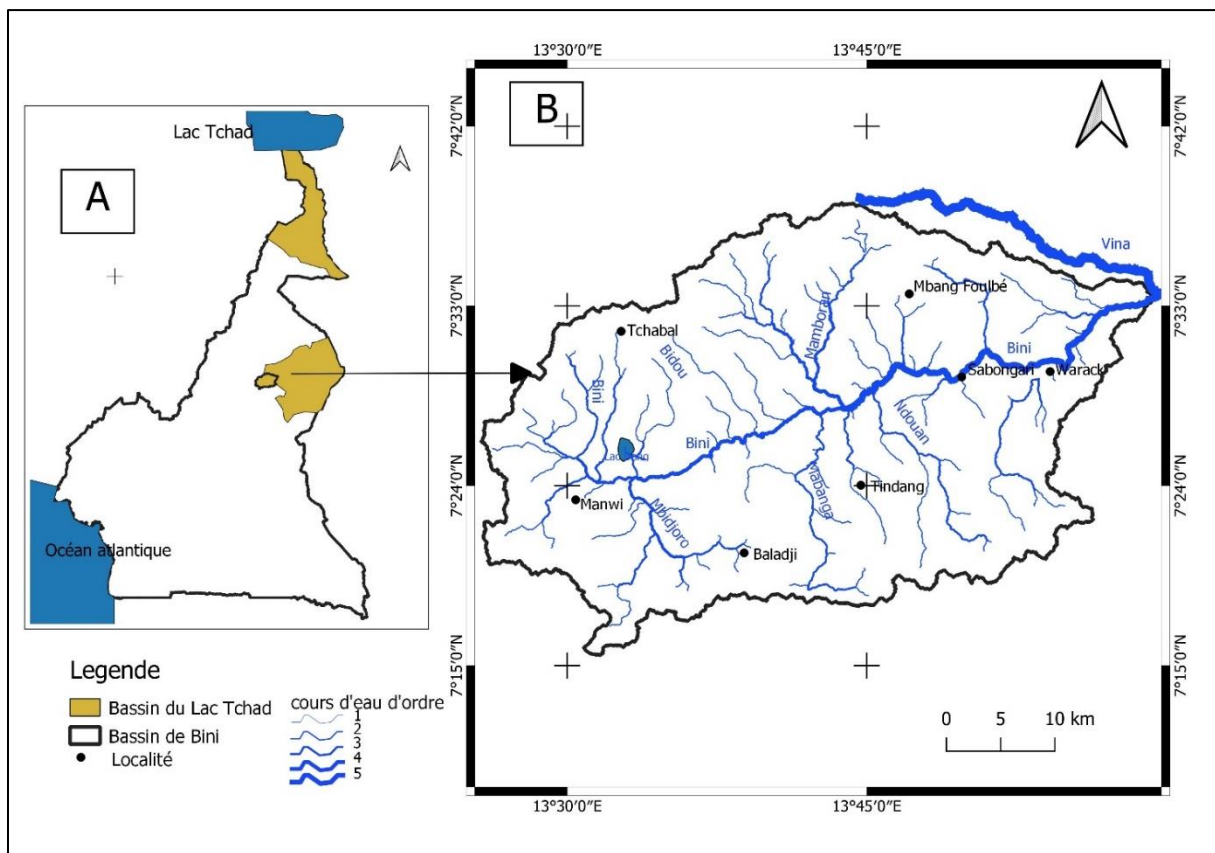


Figure 4 : Carte hydrographique de la zone d'étude. ; A) bassin versant de Bini dans le grand bassin du lac Tchad ; B) bassin versant de Bini ;

I.1.5 Géologie

I.1.5.1 Lithologie

Le socle de l'Adamaoua appartient au domaine Centre-Cameroun et est constitué de roches métamorphiques et de granitoïdes mis en place au cours de l'orogénèse panafricaine (615 ± 27 à 652 ± 10 Ma) (Temdjim *et al.*, 2004 ; Dawai *et al.*, 2017 ; Saha-Fouotsa *et al.*,

2019). Le plateau de l'Adamaoua présente des horsts volcaniques d'altitude moyenne de 1100 m sur lesquels sont épanchées de grandes coulées basaltiques d'âge Mio-pliocène accompagnées de trachytes et de phonolites d'âge Miocène (Nkouandou *et al.*, 2008). Ce plateau présente les coulées basaltiques anciennes, complètement latéritisées qui se reconnaissent grâce à leur faciès rouge d'altération (Lasserre, 1961 ; Nkouandou *et al.*, 2010). Les données pétrographiques et géochimiques sur les granitoïdes de Ngaoundéré (Tchameni *et al.*, 2006) et de Meiganga (Ganwa *et al.*, 2008) ont permis de révéler trois types de granitoïdes d'âges panafricain à savoir : les granitoïdes syn-tectoniques (630- 620Ma), tardi-tectoniques (600-580Ma) et post-tectoniques (550 Ma). Ils forment une grande variété de roches à savoir : granites à biotite et amphibole, granite à muscovite et biotite, granite à biotite seul (Tchameni *et al.*, 2006). Ces granitoïdes appartiennent à la série calcoalcaline très potassique à shoshonitique (Ganwa *et al.*, 2011).

I.1.5.2 Pédologie

Les sols du plateau de Ngaoundéré, en général, ont fait l'objet de nombreuses études (Laplante et Bachelier, 1954 ; Humbel, 1966 ; Volger et al., 1982 ; Boutrais, 1995). Le sol de la commune de Ngaoundéré 3 est de type ferrallitique. Ils sont de couleur brun rouge ou brun. Quelques horizons cuirassés ou latéritiques affleurent à la suite de la destruction des minces horizons sablo argileux supérieurs. La structure de ces sols est fortement dégradée dans les zones de cultures (bas-fonds en particulier avec l'apport abusif des intrants chimiques) et dans les zones de pâturage (piétinement suivi de compactage).

Ngaoundéré 3ème présente 2 ensembles plus ou moins calqués sur le substrat et dépendant du relief : Dans les collines, les sols sont jeunes, peu épais aux horizons peu différenciés sur les édifices volcaniques récents ou tronqués par l'érosion sur les versants à forte pente tandis que sur le plateau, ils sont beaucoup plus évolués avec des horizons bien distincts.

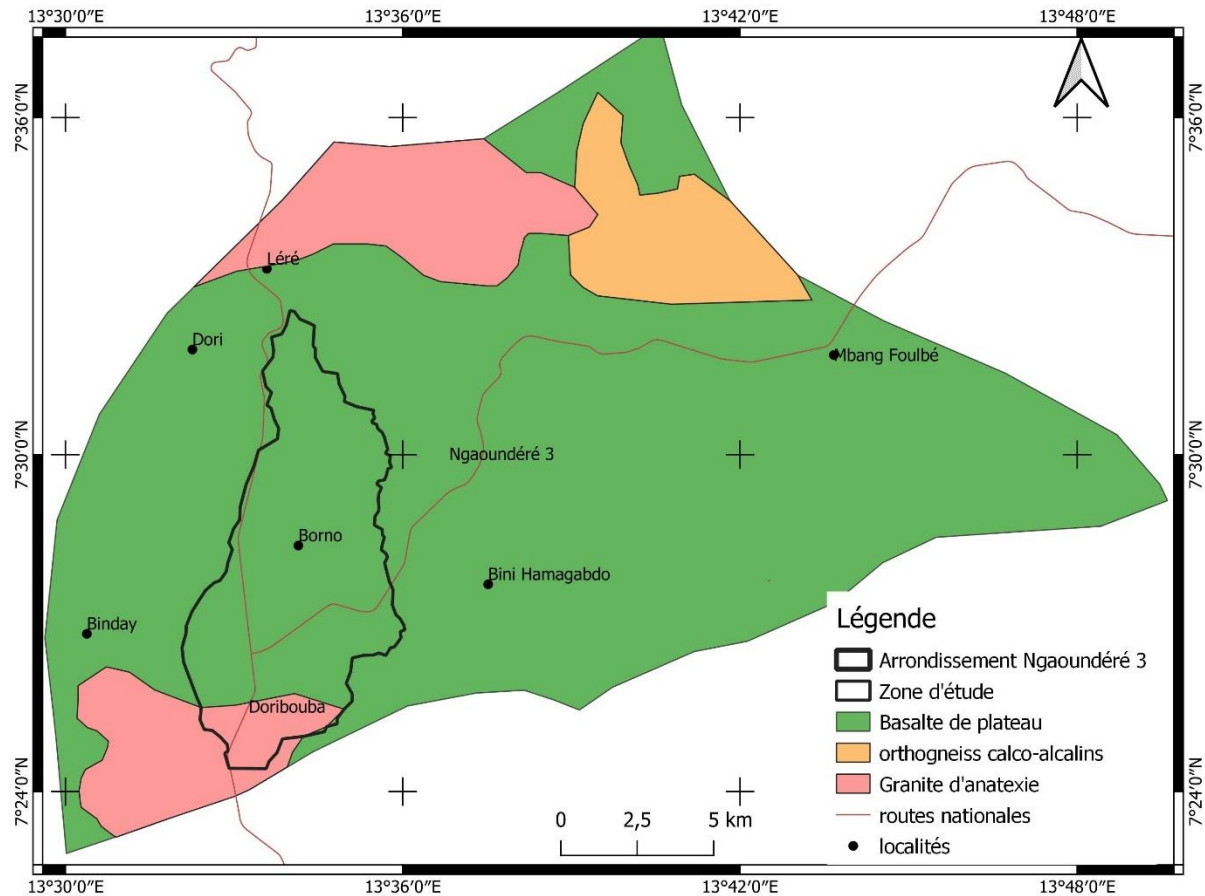


Figure 5 : Carte géologique de la zone d'étude (source : INC 2019)

I.1.6. Population et activités socio-économiques

Suite au troisième recensement général de la population et de l'habitat du Cameroun effectué par le BUCREP en 2017, la population de la commune de Ngaoundéré 3 est chiffrée à environ 61000 âmes. Cette zone est occupée par les Peulh, Kanouri, Dii, Haoussa, Mboum, Bamoun, Bamiléké, Toupouri, Moundang, Gbaya et des étrangers constitués en majorité de Tchadiens, Centrafricains et Gabonais (PCD, 2013).

L'activité économique est orientée principalement vers l'agriculture, l'élevage, le petit commerce, le transport, et la couture. L'accessibilité à l'eau potable dans la zone d'étude repose essentiellement sur les puits et les forages à cause de l'inexistence du réseau de distribution à l'eau potable gérée par la Camwater. Ces eaux sont utilisées pour la boisson, la lessive et l'abreuvement des bœufs.

I.2 QUELQUES TRAVAUX ANTERIEURS

Plusieurs études ont été effectuées en sciences de l'eau dans la région de l'Adamaoua. En hydrologie, hydrochimie, hydrobiologie et hydrogéologie, des études menées par Tamonkem (2024) dans l'Adamaoua-Yade ont montré à travers des études piézométriques que le comportement hydrodynamique est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques. Du point de vue hydrochimique, ils ont révélé que les teneurs en cations et en anions des eaux souterraines et de surface sont inférieures aux normes recommandées par l'OMS sur la qualité de l'eau destinée à la consommation à l'exception des nitrates. Les études menées par Fouépé Takounjou et al., (2022) sur la disponibilité de l'eau pour l'agriculture dans le plateau de l'Adamaoua ont montré à travers l'hydrodynamique que les valeurs des transmissivités indiquent un potentiel en eau souterraine modéré avec une recharge annuelle moyenne de 96 mm. La carte d'aptitude agricole montre que seulement 8,8 % de la superficie du bassin est très favorable pour l'agriculture et que 51% du bassin n'est pas favorable à l'agriculture, en raison de la rareté de l'eau pendant la saison sèche. et de la profondeur considérable à la nappe phréatique.

CONCLUSION

La commune d'arrondissement de Ngaoundéré III fait partie des huit arrondissements que compte le département de la Vina. Elle est caractérisée par une précipitation annuelle de 1554,63 mm/an pour la période allant de 1981 à 2022. La température moyenne annuelle est de 28,55°C. La commune de Ngaoundéré III appartient au bassin versant de Bini sous bassin du lac Tchad (partie meridionale). Les formations géologiques rencontrées sont les granitoïdes, les basaltes alcalins, les altérites (sables et argiles). Les sols rencontrés sont les sols ferrallitiques (rouges latéritiques formés sur basalte, les sols bruns), les sols hydromorphes. L'hydrogéologie montre que l'aquifère capté est celui des nappes d'altérites. La végétation est caractérisée par la savane arbustive en état de dégradation. Sur le plan socio-économique, Ngaoundéré est caractérisé principalement par l'agriculture et l'élevage (bovins et volailles). L'exploitation des nappes repose essentiellement sur les puits et forages. La population du secteur d'étude n'a pas accès à l'eau potable du fait de la quasi inexistence du réseau de distribution géré par la Camwater.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

INTRODUCTION

Ce chapitre présente la méthodologie adoptée pour mener à bien la présente étude. Elle prend en compte la recherche documentaire et cartographique, les travaux sur le terrain et en laboratoire.

II.1. RECHERCHE DOCUMENTAIRE ET CARTOGRAPHIQUE

Cette étape a permis de ressortir une synthèse des travaux réalisés dans la zone d'étude et ses environs ainsi que ceux réalisés dans d'autres sites ayant le même contexte géologique et géomorphologique touchant de près ou de loin la problématique développée dans la présente étude. Ainsi les ouvrages scientifiques (articles, mémoires et thèses), les documents cartographiques, les images satellitaires et photos aériennes de la région de l'Adamaoua et ses environs en général et de la zone d'étude en particulier ont été d'une importance capitale.

II.2. TRAVAUX DE TERRAIN

Les travaux de terrain ont consisté à la reconnaissance et la localisation du site d'étude, aux choix et à la description des points de prélèvement, au recensement des puits et forages pour le suivi piézométrique, la réalisation des tests de pompage, et enfin au prélèvement et conditionnement des échantillons pour le laboratoire.

II.2.1 Reconnaissance et localisation du site d'étude

Une campagne de reconnaissance du site a été effectuée au préalable en Mars 2021. Celle-ci a permis de se familiariser avec le terrain, localiser géographiquement le site d'étude et d'élaborer une méthodologie d'investigation efficace sur le terrain.

Le bassin versant de Bidou est le site retenu pour la présente étude. Il est situé dans la commune d'arrondissement de Ngaoundéré 3 (Adamaoua-Cameroun) entre les parallèles 7°24' et 7°33' N et les méridiens 13°31' et 13°37' E (Figure 6). Bidou est le cours d'eau principal de ce bassin. Il est grossi par ses principaux affluents (Malang et Gada-Bidou) et le Lac Dang.

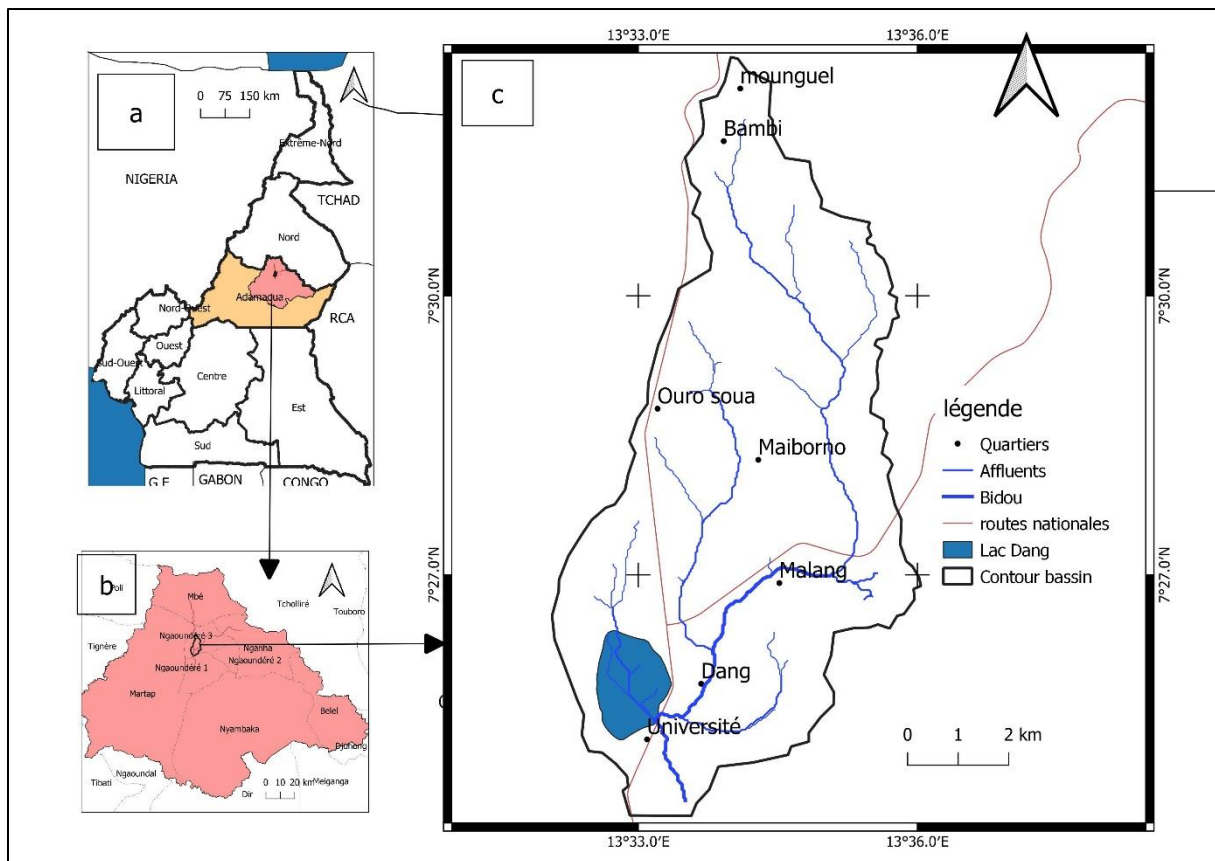


Figure 6 : Localisation géographique du bassin versant de Bidou à Ngaoundéré. a) Adamaoua et département de la Vina au Cameroun ; b) Bassin versant de Bidou dans l'arrondissement de Ngaoundéré IIIème ; c) Site d'étude.

II.2.2 Choix et description des points suivis et prélevés

Les points qui ont fait l'objet des suivis piézométriques et d'échantillonnage des eaux ont été choisis selon les critères ci-après :

- les types d'eau : souterraines (source, puits et forage) et de surface (Bidou) ;
- le taux de sollicitation de l'ouvrage et la densité des populations autour de l'ouvrage pour évaluer l'influence anthropique ;
- l'accessibilité et l'accord des propriétaires des ouvrages ;
- la répartition spatiale.

Au total, 77 points ont été identifiés dans le bassin versant du Bidou parmi lesquelles 62 puits retenus pour le suivi piézométrique (cf. annexe 1) pendant la période de Mars 2021 (saison sèche) et Août 2021 (saison de pluie) dont 10 ont fait objet d'analyse. 10 points d'échantillonnage de rivière et 05 forages ont également été analysés. Les coordonnées géographiques de ces ouvrages sont déterminées à l'aide d'un GPS (Global Positionning

System) de marque Garmin (Tableau 2) et la cartographie des points suivis et échantillonnés est présentée par la figure 7.

Tableau 2 : Points d'échantillonnage et leurs coordonnées

Ouvrages	Longitude	Latitude	Altitude (m)
P1	13,58478	7,429559	1134
P2	13,577387	7,455417	1128
P3	13,575059	7,487408	1150
P4	13,556229	7,488081	1167
P5	13,562201	7,467736	1142
P6	13,540574	7,430037	1087
P7	13,553925	7,448196	1137
P8	13,555945	7,428766	1137
P9	13,561859	7,527467	1286
P10	13,566295	7,540712	1381
R1	13,563165	7,436497	1092
R2	13,559645	7,437568	1093
R3	13,565345	7,44117	1094
R4	13,583748	7,449215	1106
R5	13,584893	7,448289	1102
E1	13,58119	7,480702	1126
E2	13,563283	7,485742	1134
R6	13,567513	7,473446	1121
R7	13,561569	7,458552	1114
R8	13,547007	7,444647	1087
R9	13,555208	7,419585	1083
R10	13,574295	7,503703	1142
F1	13,56499	7,54273	1383
F2	13,55288	7,46055	1122
F3	13,56398	7,49804	1099
F4	13,55676	7,42061	1083
F5	13,55578	7,43688	1083

II.2.3. Mesure des niveaux d'eau souterraine

La mesure des niveaux d'eau souterraine dans le bassin versant de Bidou s'est faite de façon ponctuelle et en continu.

II.2.3.1. Mesures ponctuelles (campagne piézométrique)

Les hauteurs d'eau dans les ouvrages ont été lues en Mars (saison sèche) et Août 2021(saison pluvieuse). Cette opération a consisté à relever les hauteurs d'eau de puits et forages choisis et à déterminer leur niveau piézométrique H (m) par la formule suivante :

$$H = Z - P.$$

Avec : Z = altitude de la surface topographique (en m) ; P = niveau statique (en m).

La profondeur du plan d'eau dans les forages a été mesurée à l'aide d'une sonde lumineuse et sonore (figure 8).

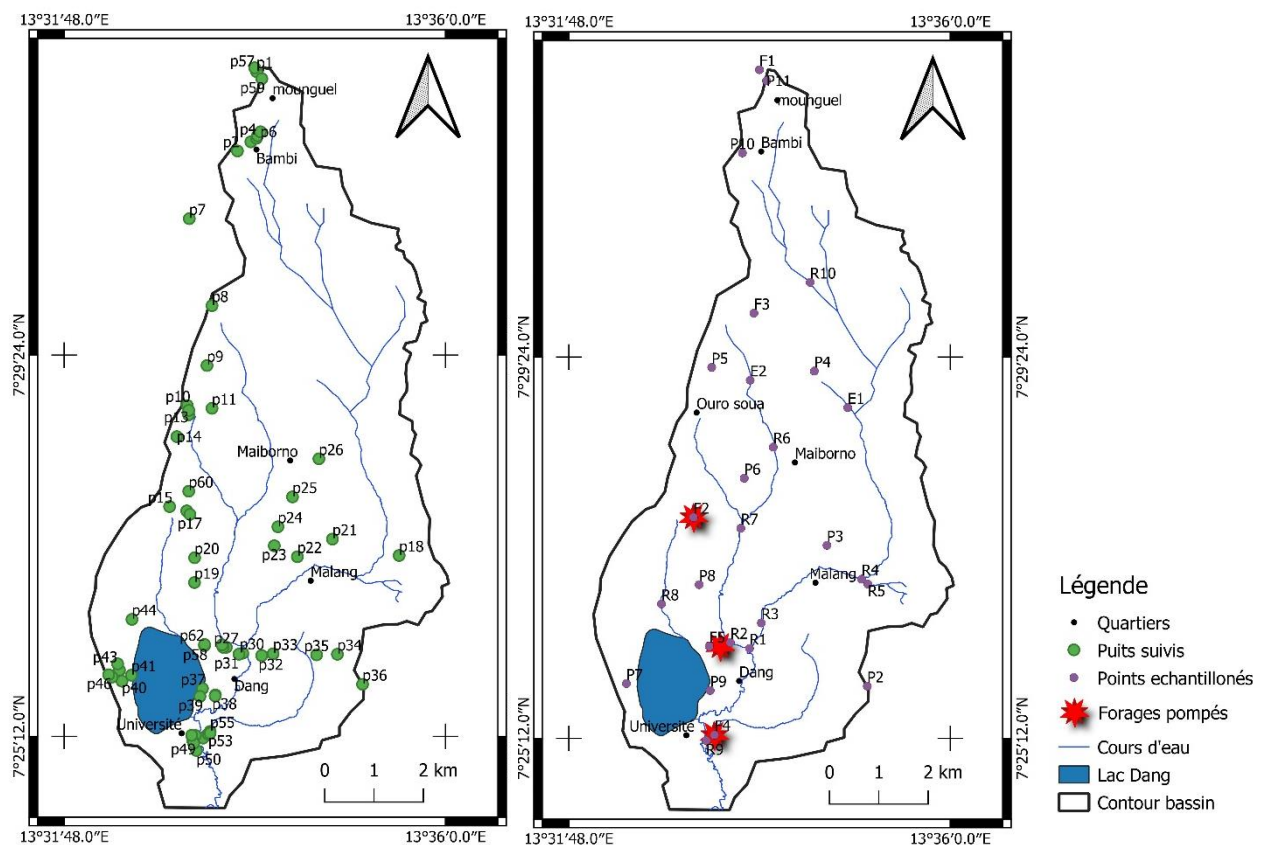


Figure 7 : Carte d'échantillonnage (à gauche) et ouvrages suivis (à droite) dans le bassin versant de Bidou. P, F et R représentent respectivement les échantillons de puits, de forage et de rivière

II.2.3.2. Mesures en continu (enregistreurs automatiques)

Les enregistreurs utilisés sont de marque **Divers**. Ils permettent d'enregistrer en continue la pression de l'eau et la pression atmosphérique dans le forage. Trois (03) forages ont

été équipés avec des enregistreurs automatiques (Figure8), notamment à Malang, Ngaoumoukon et à Gadabidou.

Dans ce cas la hauteur piézométrique H (par rapport au niveau moyen de la mer) se calcule à partir de la mesure de l'enregistreur, la hauteur piézométrique H_a (m) se calcule avec l'équation (1) où L_c est la longueur du câble (m) auquel l'enregistreur est suspendu et P_{eau} est calculée à partir des mesures des enregistreurs.

$$H_a = Z - L_c + P_{eau}.(1)$$

II.2.4. Essai in situ de la perméabilité par la méthode Porchet (1931)

La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau dans les conditions hydrodynamiques imposées (Castany, 1998). Ce paramètre permettant d'estimer les caractéristiques hydrodynamiques a été déterminé par la méthode de Porchet (Fouepé et al., 2012). Elle consiste à suivre, en fonction du temps, l'infiltration d'une quantité d'eau versée dans un trou de tarière (Figure 8). Le niveau de l'eau dans le trou est porté sur une fiche préconçue en fonction du temps (Annexe.7). Dans le cadre de cette étude, des trous de rayon variant entre 3 à 6 cm et de profondeur allant de 50 cm et 60 cm ont été réalisés à la tarière manuelle (Figure 8). Ils ont été effectués sur des terres cultivées et des terres en jachères qui sont des sols argileux limoneux bruns rougeâtres généralement constitués d'une couche poussiéreuse sèche entre 0-10 cm de profondeur. Une concrétion dure brun-rougeâtre contenant du quartz de la taille d'un gravier (probablement des grès altérés) a été rencontrée dans la plupart des sites à environ 10 cm sous la surface du sol. Dans la zone d'étude, treize essais d'infiltration (Figure.9) ont été effectués en Mars de l'année 2020 par Foano (2020).



Figure 8 : Présentation en (a) des datas loggers pour enregistrement automatique ; en (b) de la sonde piézométrique lumineuse pour enregistrement manuel ; en (c) de la tarière manuelle et en (d) d'un trou de tarière.

II.2.5. Essai de pompage

Trois essais de pompage ont été réalisés en Août 2021 pour évaluer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère sous-jacent dans le bassin versant du Bidou. Ces essais ont duré environ 48 heures (24 heures de pompage et 24 heures de remontée) avec un débit de pompage moyen de 1 l/s. Tous les forages testés ont un diamètre de forage de 4'' (11 cm). L'équipement utilisé comprenait une pompe submersible, un générateur de 2500 W, deux enregistreurs automatiques, un tuyau flexible de 100 m et un compteur volumétrique d'eau.

II.2.6. Mesure in situ des paramètres physico-chimiques des eaux

Les paramètres physico-chimiques pris en compte dans la présente étude sont : la température de l'eau (T°C), le pH, la conductivité électrique (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$) et la TDS (mg/l), Ces

paramètres ont été déterminés à l'aide d'un multiparamètre muni de deux électrodes, Pour la mesure de ces paramètres, les électrodes sont directement plongées dans un récipient (seau de 10 l) contenant l'échantillon d'eau à mesurer.

II.3. TRAVAUX DE LABORATOIRE

Les travaux de laboratoire ont consisté à la caractérisation physiographique du bassin versant de Bidou ; à l'élaboration des cartes piézométriques, à l'analyse et au traitement des données d'essai de pompage ; à la détermination des paramètres physico-chimiques et enfin, à la synthèse et traitement des différents données obtenues.

II.3.1. Caractérisation physiographique du bassin versant de Bidou

Elle a consisté à déterminer les caractéristiques géométriques ou morphométriques (surface, périmètre, relief, pente, et hypsométrie) et hydrographiques (densité de drainage et hydrographique, le rapport de confluence et de longueur) du bassin versant de Bidou, pour cela, une carte topographique numérisée au 1/500000 a été utilisée pour effectuer cette tâche.

II.3.1.1. Caractéristiques géométriques et morphométriques

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

a. Surface et périmètre

L'aire et le périmètre d'un bassin versant peuvent être mesurés par superposition d'une grille dessinée sur papier transparent, par l'utilisation d'un planimètre (aire), d'un curvimètre (périmètre) ou mieux encore par des techniques de digitalisation. Cette dernière méthode a été utilisée dans le bassin versant de Bidou à l'aide du logiciel Qgis 3.26.

b. Forme

C'est l'élément essentiel d'un bassin versant. La forme d'un bassin versant influence l'allure de l'hydrogramme à l'exutoire. La forme du BVB a été déterminée à l'aide de l'indice de compacité de Gravelius (1914) noté K_G et donné par la relation suivante :

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

K_G = indice de compacité de Gravelius ;

P = périmètre du bassin [km] ;

A = superficie du bassin [km²],

c. Dimensions du rectangle équivalent

Le rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius permet de comparer facilement des bassins versants entre eux en ce qui concerne le ruissellement des eaux (Musy, 2004).

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

$$L_{eq} = \frac{K_C \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - (1,12 K_C)^2} \right]$$

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

d. Relief

Le relief influence certains paramètres hydrométéorologiques tels que les précipitations, le ruissellement et l'écoulement au sein du bassin. Ce dernier représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction des tranches d'altitude. Il permet de déterminer les paramètres tels que : l'altitude maximale (H_{max}), l'altitude minimale (H_{min}) et l'altitude moyenne donné par l'expression : $H_{moy} = \frac{A_i H_i}{A}$ avec : A_i (en km^2) et H_i (en m) étant respectivement la surface spécifique et l'altitude moyenne entre deux courbes de niveau ; A est la surface totale du bassin versant, en Km^2 ; H_{moy} est l'altitude moyenne du bassin versant (en m). L'altitude médiane H_{med} est lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin versant, sur la courbe hypsométrique.

- Pente moyenne du bassin versant (I_m)

$$I_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{A} ; [\text{en m/km}]$$

- Indice pente de Roche 1963 (I_r)

$$I_r = \frac{A_i H_i}{L_{eq}} ; [\text{en m /km}]$$

-Indice global de pente (I_g)

$$I_g = \frac{H_5 - H_{95}}{L_{eq}} ; [\text{en m/km}]$$

- Dénivelée spécifique (D_s)

$$D_s = I_g \sqrt{A}$$

II.3.1.2 Caractéristiques hydrographiques

La hiérarchisation du réseau hydrographique du bassin versant de Bidou est faite selon la méthode de classification de Musy (2005), dont le principe est le suivant :

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

Le développement du bassin versant du Bidou consiste à déterminer les paramètres tel que : densité de drainage (Dd) ; densité hydrographique (Dh) ; indice de dissection (Id) ; coefficient de torrentialité (Ct) ; pente moyenne (Pmoy) à partir des formules si après :

$$Dd = \frac{Lw}{A} \text{ (en km /km}^2\text{)} ; Dh = \frac{Nw}{A} \text{ (en km}^{-2}\text{)} ; Id = \frac{N1}{A} ; Ct = Dd.Dh ; Pmoy = \frac{\Delta_{max}}{L} \text{ (en m/km)}.$$

Avec : Lw et Nw qui sont respectivement longueur et nombre de cours d'eau d'ordre w ; Δ_{max} et L qui sont respectivement dénivellation maximale et la longueur du cours d'eau principal ; N1 le nombre de cours d'eau d'ordre 1,

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

$$Rc = \frac{nw}{nw+1} ; Rl = \frac{lw+1}{lw} . \text{ Ou } n_w \text{ et } l_w \text{ sont respectivement le nombre et la longueur des cours d'eau d'ordre } w.$$

II.3.2. Détermination des paramètres chimiques

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

Les analyses géochimiques des échantillons d'eau de surfaces et souterraines ont été effectuées au laboratoire de l'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles (BGR), Hanovre/Allemagne. Les cations (Na^{2+} , K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+}) ont été analysés par spectrométrie d'émission optique à plasma inductif à l'aide d'un Ciro by Spectro (DIN EN ISO 11885 51998). Les anions (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) ont été mesurés par chromatographie ionique (IC-Dionex ICS-3000) (DIN EN ISO 10304-1 (1997)). L'ion ammonium a été déterminé par spectrophotométrie à l'aide d'un Unicam UV300 (Thermo Electron Corporation) avec du bleu d'indophénol (DIN 38406E5 : (1983)). Les oligo-éléments (F^- , Fe et le Mn) ont été mesurés sur un Agilent 7500ce ICP-MS.

II.3.3. Détermination de la perméabilité à saturation

Les données collectées sur le terrain lors des essais de Porchet ont été traitées à partir du logiciel Microsoft Excel 2016. Une feuille de calcul Excel a été préalablement programmée

pour effectuer les calculs résultant des formules empiriques développées par Porchet (1931) suivant la loi de Darcy. La perméabilité (K) est définie par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. K est exprimé en m/s, $Q = K \cdot i \cdot S$ (1) avec $S = 2\pi R h + \pi R^2$ (1)

Avec : S = la surface d'infiltration (en m^2) ; R = rayon du trou (en m) ; h = la hauteur d'eau dans le trou (en m) ; i = le gradient hydraulique.

$$- Q = -dV/dt = -\pi R^2 dh/dt \quad (2)$$

En égalant (1) et (2) on obtient :

$$- (2K / 2,3R), t = -\log (h + R/2) + cste$$

La valeur de (K) s'obtient en traçant la courbe $\log (h + R/2)$ en fonction du temps à l'échelle semi-logarithmique (Annexe 6). Une fois le régime stabilisé, on obtient une droite de pente :

$$p = -2K / (2,3R).$$

La perméabilité est donc obtenue par la relation suivante :

$$K = -p (2,3R/2)$$

Avec : K : perméabilité (en $m.s^{-1}$) ; R : rayon du trou (en m) ; P : pente de la droite représentative de l'essai d'infiltration $\log (h + R/2) = f(t)$.

II.3.4. Elaboration des cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont des cartes construites en courbes iso valeurs et qui représentent à une date donnée, la distribution des charges et des potentiels hydrauliques. Pour réaliser ces cartes, les logiciels de cartographie tels que Qgis 3.26 et Surfer 18 ont été utilisés et la méthode d'interpolation des données piézométriques a été mis en exergue. Cette méthode a permis d'identifier sur les cartes élaborées les zones favorables à l'implantation des ouvrages de captage et à proposer des mesures de protection de la qualité des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaines sur le site d'étude (Bon et al., 2016).

II.3.5. Méthodes d'interprétation des données d'essais de pompage

Les données collectées sur le terrain lors des essais de pompage ont été traitées à partir du logiciel Aquifer test 2016.1 et interprétées avec la méthode de **Neuman(1974)** car approprié pour les aquifères non confinés. Ainsi après traitement, les valeurs de transmissivité et coefficient d'emmagasinement ont été obtenues. Les données obtenues seront classifiées selon Struckmeier et Margat (1995).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \cdot (u_A, u_B, \beta)$$

$$u_A = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

$$u_B = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$$

s=rabatement mesuré dans le piézomètre en m ;

Q= débit de pompage constant en m³/s ;

T= transmissivité en m²/s ;

S= coefficient d'emménagement sans dimension ;

t= temps écoulé, à un instant donné, depuis le début du pompage en seconde ;

r= distance radial en m.

II.3.6. Analyse hydrochimique

La classification hydrochimique des eaux a été effectuée à l'aide du diagramme triangulaire de Piper (1944). Ce dernier est l'outil le plus fréquemment utilisé dans le domaine de l'hydrochimie pour déterminer les différents faciès hydrochimiques. Il est composé de deux triangles qui représentent les faciès cationiques et anioniques et un losange représentant la synthèse globale des faciès.

La qualité des données chimiques a été évaluée en vérifiant la balance ionique (BI).

$$CBE = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100 \text{ (les cations et anions sont exprimés en méq/l)} \quad (1)$$

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

II.3.7. Analyse statistique

La méthode de traitement des données utilisée est la statistique descriptive qui est basée sur l'analyse des caractéristiques descriptives des paramètres physico-chimiques. Elle concerne les valeurs extrêmes (minimum et maximum), la valeur centrale (moyenne), la médiane, etc (Kouassi et al., 2010). Pour cela, des histogrammes de fréquence ont été représentés à l'aide du logiciel Excel 2016 pour l'illustration. Ensuite des analyses statistiques multivariées, à savoir l'analyse en composante principale (ACP) et la matrice de corrélation ont été effectuées.

II.4. ELABORATION DU MODELE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE BASSIN VERSANT DU BIDOU

II.4.1. Définition et objectif d'un modèle

Le modèle désigne une représentation simplifiée de la réalité. En hydrogéologie la modélisation est de simplifier la représentation d'un système hydrogéologique, de mesurer le degré de compréhension de son fonctionnement et de prédire son comportement futur. Un modèle est donc basé sur une approximation de la réalité.

Les objectifs principaux de la modélisation sont :

- de réaliser des prédictions sur le comportement du système considéré en réponse à des sollicitations ;
- d'obtenir les informations nécessaires afin de respecter certaines recommandations ou législations ;
- d'obtenir une meilleure compréhension du système d'un point de vue hydrogéologique, chimique ou même géologique ;
- de fournir l'information nécessaire afin de définir le réseau de mesures à installer ;
- de fournir des informations pouvant aider à l'organisation de nouveaux tests in situ.

II.4.2. Type de modèles

La justification du modèle repose sur le fait que les mêmes équations régissent les phénomènes en vraie grandeur et en modèle réduite. Actuellement, différents types de modèles hydrologiques existent :

- modèles à base physiques / modèles conceptuelles / modèles empiriques, selon qu'ils cherchent à modéliser des phénomènes physiques, des observations ou à seulement reproduire une sortie (débit),
- modèles déterministe / modèle stochastiques, selon qu'ils utilisent des paramètres uniques ou une densité de probabilité,
- modèles globaux / modèles distribués, selon que les paramètres sont supposés constants dans l'espace ou qu'ils prennent des valeurs différentes dans l'espaces et dans le temps.

II.4.3. Etapes de la modélisation

Les phases de développement d'un modèle de circulation d'eau souterraine (Figure 9) sont :

- définition du but du modèle ;
- créer le modèle conceptuelle et la constitution d'une base de données ;

- constitution du modèle (code informatique) ;
- calage de modèle (l'étape la plus difficile) ;
- analyse sensitive (l'étape de sensibilité du modèle) ;
- validation ;
- prédiction ;
- prédiction de la sensibilité ;
- discussion des résultats.

Dans le cas de cette étude on va se limiter à la création du modèle conceptuel.

Le modèle conceptuel est une étape cruciale et la première dans le développement de la modélisation des eaux souterraine (Anderson et coll., 2015). Il permet d'avoir une vue d'ensemble systématique et cohérente des limites internes, des propriétés et des processus du système.

Le développement de modèles conceptuels est fait sur la base des informations géologiques, hydrologiques et hydrochimiques disponibles mais aussi à partir des interprétations d'expert.

Le modèle conceptuel élaboré sera donc une représentation de différentes formations géologiques et hydrogéologiques se présentant sous forme de coupe géologique. Ce modèle conceptuel est fondé sur la géométrie de l'aquifère d'altérite qui se réfère à la spécification du toit et du mur ainsi que de l'épaisseur et l'extension latérale de la nappe. Pour les aquifères à nappe libre, le toit de l'aquifère correspond à la surface topographique alors que le toit de la nappe est représenté par le niveau piézométrique. Ainsi, la surface du sol a été considérée afin de déterminer un réseau de points à partir de la carte topographie à l'échelle 1/10000. Quant au mur de l'aquifère, sa limite n'est pas connue avec exactitude. Le mur a donc été estimé sur la base de l'épaisseur des altérations obtenue dans le forage, des observations des profils d'altération, des profondeurs des puits et des données géophysiques.

Les données de quelques forages situés au sein et aux alentours du bassin versant de Bidou, puis la compilation des investigations, hydrodynamiques, géophysiques et hydrochimiques sont des informations qui nous a permis de proposer une image synthétique de la structure et du fonctionnement du socle fissuré et altéré du Bassin de Bidou.

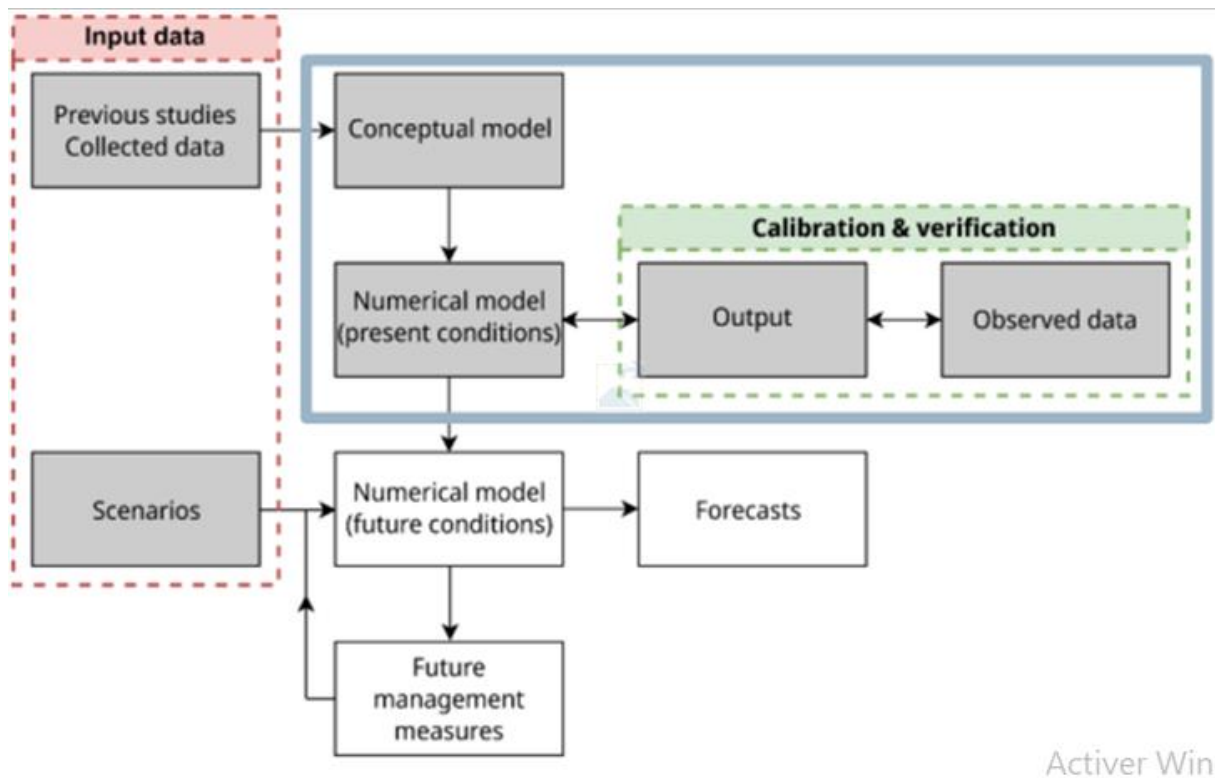


Figure 9 : Etapes de développement d'un modèle

CONCLUSION

Durant cette étude, vingt-neuf (29) échantillons d'eau ont été prélevés après que les paramètres physiques (pH, T°C, C.E) soient effectués directement sur le site. Les analyses des différents paramètres chimiques tels que les cations et anions majeurs ont été effectuées à l'Institut fédéral des géosciences et des ressources naturelles (BGR), Hanovre-Allemagne). La compilation des investigations, hydrodynamiques, géophysiques et hydrochimiques sont des informations qui ont permis de proposer un modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du Bassin versant de Bidou à travers une image représentant le fonctionnement du socle fissuré et altéré.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

INTRODUCTION

Ce chapitre présente et discute les résultats qui se rapportent aux comportements hydrodynamiques, à la qualité des eaux du bassin versant de Bidou et à l'élaboration du modèle conceptuel dudit bassin.

III.1 CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES ET HYDROGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE BIDOU

III.1.1 Caractéristiques morphométriques

Le BV de Bidou a une superficie de 60 km² et un périmètre de 55,41 km. L'indice de compacité est égal à 2 ; ce qui lui confère une forme allongée assimilable à un rectangle équivalent de longueur 25,5 km et de largeur 2,36 km. Le BV de Bidou appartient au plateau de l'Adamaoua d'altitudes comprises entre 1075 m et 1375 m (Tableau 3). Il présente un relief caractérisé par l'alternance des collines et des vallées évoluant du sud vers le nord ; ainsi l'agencement du site révèle une subdivision du site en 05 unités géomorphologiques (Figure 11).

La différence entre les tranches d'altitude et les surfaces spécifiques a permis de mettre en évidence la courbe hypsométrique du bassin versant du Bidou (Figure 10). Les altitudes H5% et H95% sont respectivement de 1110m et 1260 m. L'altitude moyenne est de 1140,45 m, les indices de pente de roche (IR) et globale (IG) sont de 0,49 m/km et 0,006 m/km respectivement. Le dénivelé spécifique égal à 46,57 m.

III.1.2. Caractéristiques hydrographiques

Le cours d'eau Bidou d'ordre 3, est l'un des affluents de la rivière Bini. Le Bidou s'écoule du nord vers le sud sur une longueur de 7,5 km. L'indice de dissection (Id), les densités de drainage (Dd), les rapports de confluence (Rc) et de longueur (Rl) du BV du Bidou sont respectivement de 0,42km² ; 0,7 km/km² ; 6,25 ; 1,31;(Tableau 4). D'après Musy, 2004 les valeurs de densité de drainage inférieures à 4 km/km² correspondent aux régions à écoulement peu développé. Il convient de dire qu'il s'agit d'un réseau centralisé vers un seul collecteur.

Tableau 3 : Paramètres physiographiques du bassin versant de Bidou

Paramètres	Symbole	Unités	Valeurs
Aire du bassin	A	km ²	60,24
Périmètre	P	km	55,41
Indice de Gravelius	kG		2
Longueur équivalente	Léq	km	25,5
Largeur équivalente	léq	km	2,36
Altitude minimale	H Min	m	1150
Altitude maximale	H Max	m	1230
Altitude moyenne	H Moy	m	1140,45
Altitude médiane	H Med	m	1150
Indice de pente de Roche	IPR	%	0,49
Indice de pente globale	IPG	%	0,006
Dénivelé spécifique	DS	km	46,57
Densité de drainage	Dd	km/m ²	0,7
Densité hydrographique	Dh	km ⁻²	0,42
Rapport de confluence	Rc		6,25
Rapport de longueur	Rl		1,31
Indice de dissection	Id		0,42

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

Tranches d'altitudes en (m)	Dénivellations spécifiques en(m)	Aires spécifiques (A _i en m ²)	Aires spécifiques (a _i en %)	Pourcentages cumulés (%)
1315-1375	60	1058300	1,76	1,76
1255-1315	60	1551500	2,58	4,33
1195-1255	60	3188400	5,29	9,63
1135-1195	60	20328000	33,75	43,37
1075-1135	60	34108000	56,63	100
TOTAUX	60234200	100		

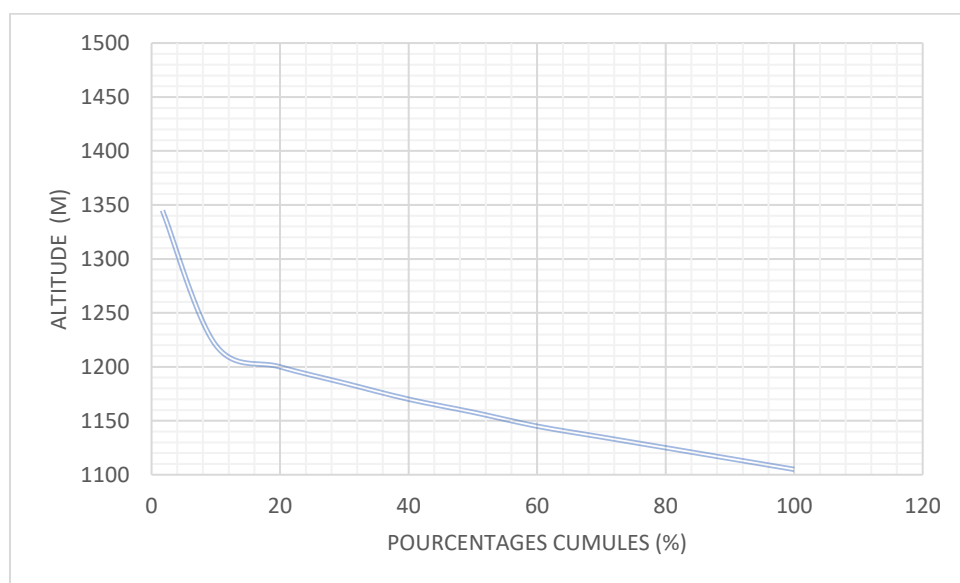


Figure 10 : Courbe hypsométrique du bassin versant de Bidou.

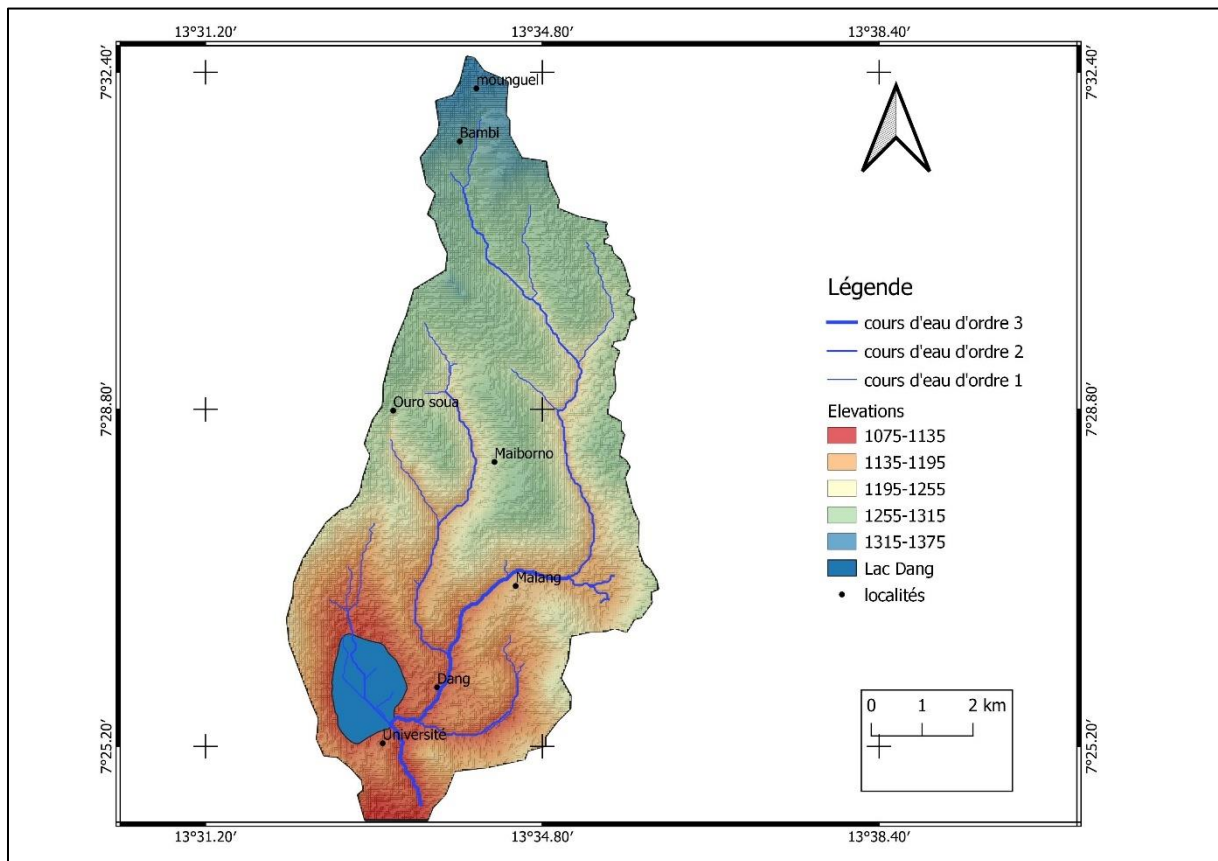


Figure 11 : Oro-hydrographie du bassin versant de Bidou

III.2. PARAMETRES HYDRAULIQUES DES AQUIFERES DE FISSURES DU BASSIN VERSANT DE BIDOU

La profondeur des forages varie entre 51 et 70 m avec une profondeur moyenne de 57 ± 37 m alors que l'épaisseur des couches d'altération varie entre 5 et 47 m.

Le pompage s'est fait à débit constant de 1 litre par seconde

a. Forage à Maiborno

La courbe de rabattement montre l'effet de stockage dans le forage pendant environ 1000 secondes comme le montre la Figure 13a. Par la suite, la courbe montre les effets d'écoulement dans une fracture (écoulement linéaire/conduit).

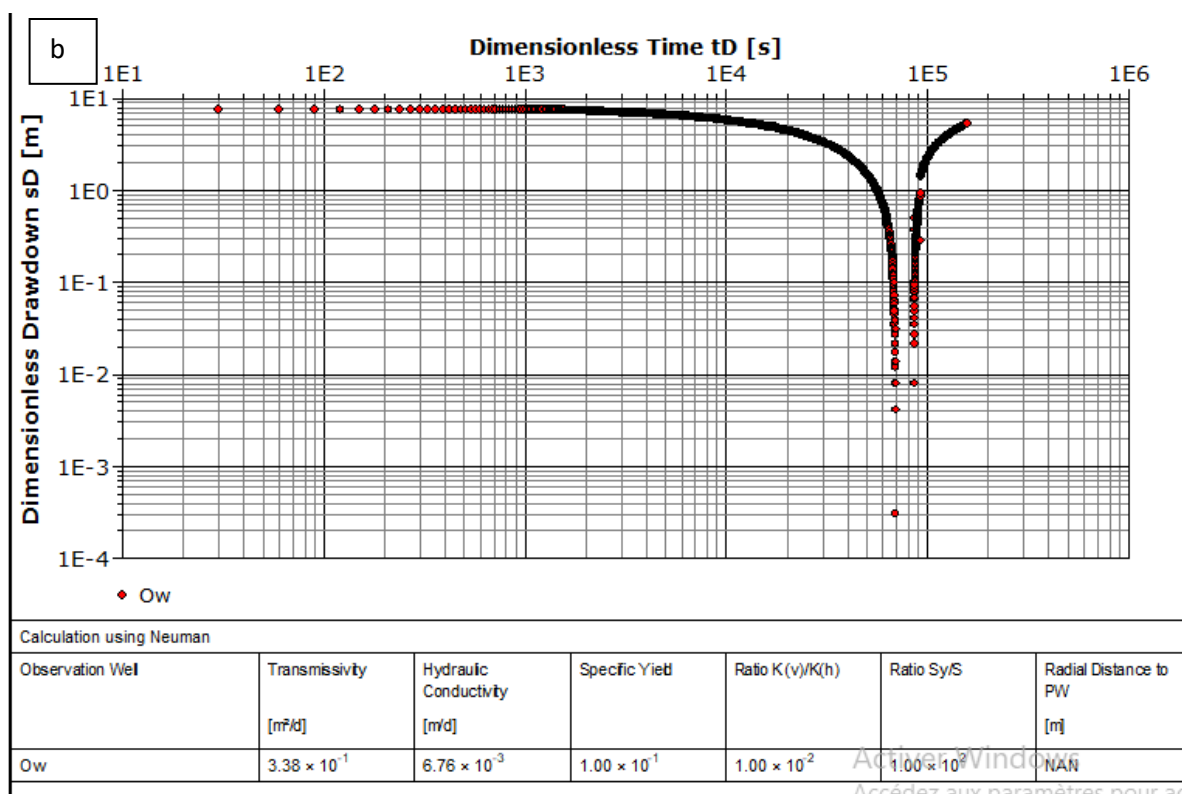
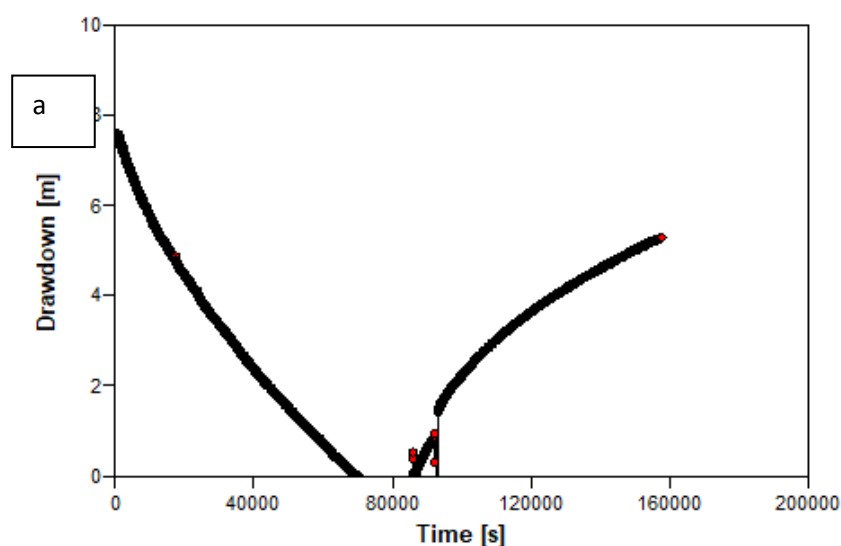


Figure 12 : Analyse graphique de l'essai de pompage de Maiborno par la méthode de Neuman

b. Forage de Gadabidou

Les courbes de rabattement et remontée obtenue serait la conséquence d'un dessèchement de crépines, (Figure 14). Par conséquent, le débit de pompage a été trop élevé pour les caractéristiques de l'aquifère et l'évaluation de l'essai est incertaine.

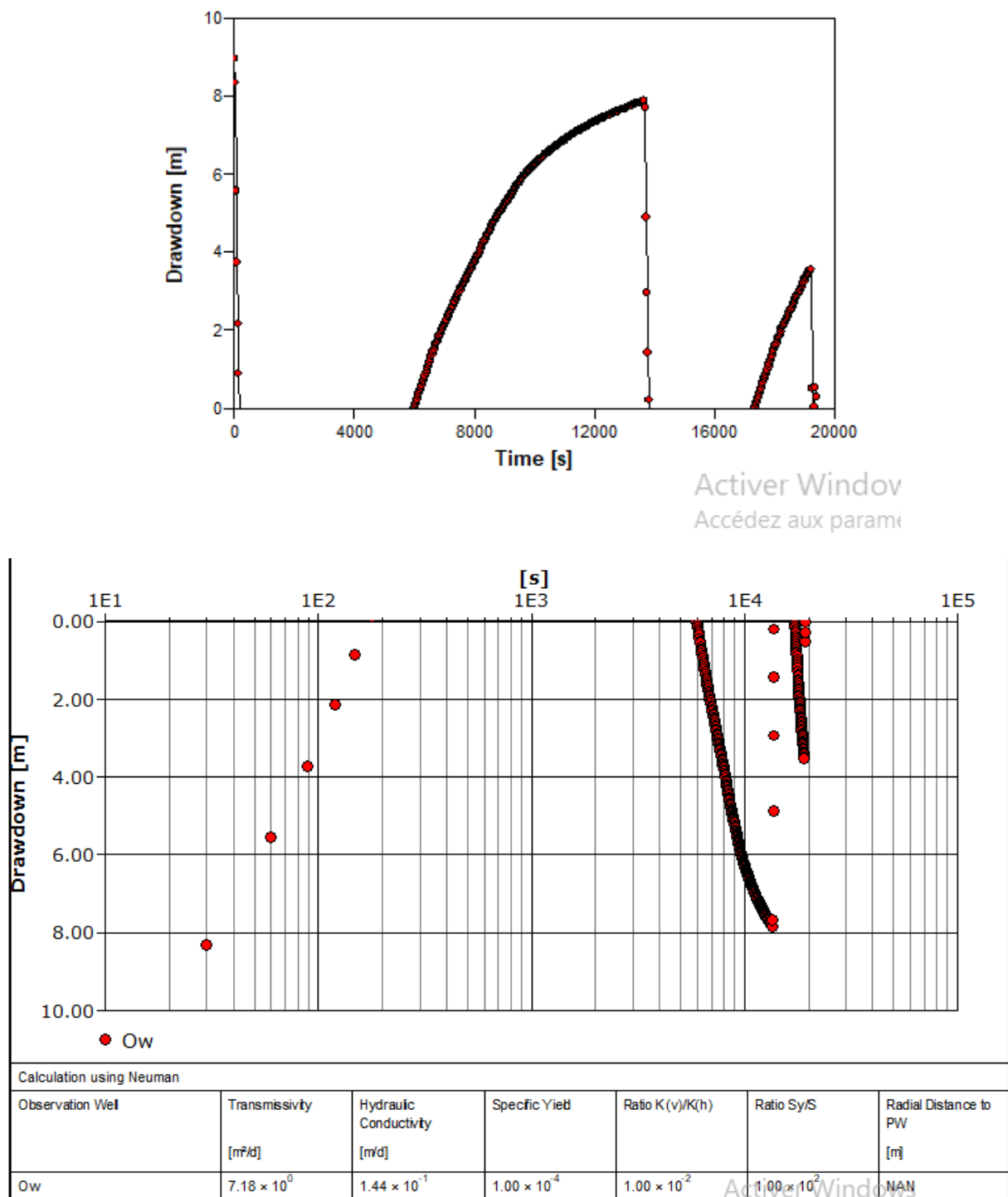


Figure 13 : Analyse graphique de l’essai de pompage de Gada Bidou par la méthode de Neuman

c. Forage à Malang

Les courbes de rabattement et de remontée montrent l’effet de stockage dans le forage dans les premiers temps (Figure 15 a et b). Le changement de pente montré par chaque courbe vers la fin de l’essai indique la présence d’une limite imperméable, c’est-à-dire une limite que ne donne pas de l’eau.

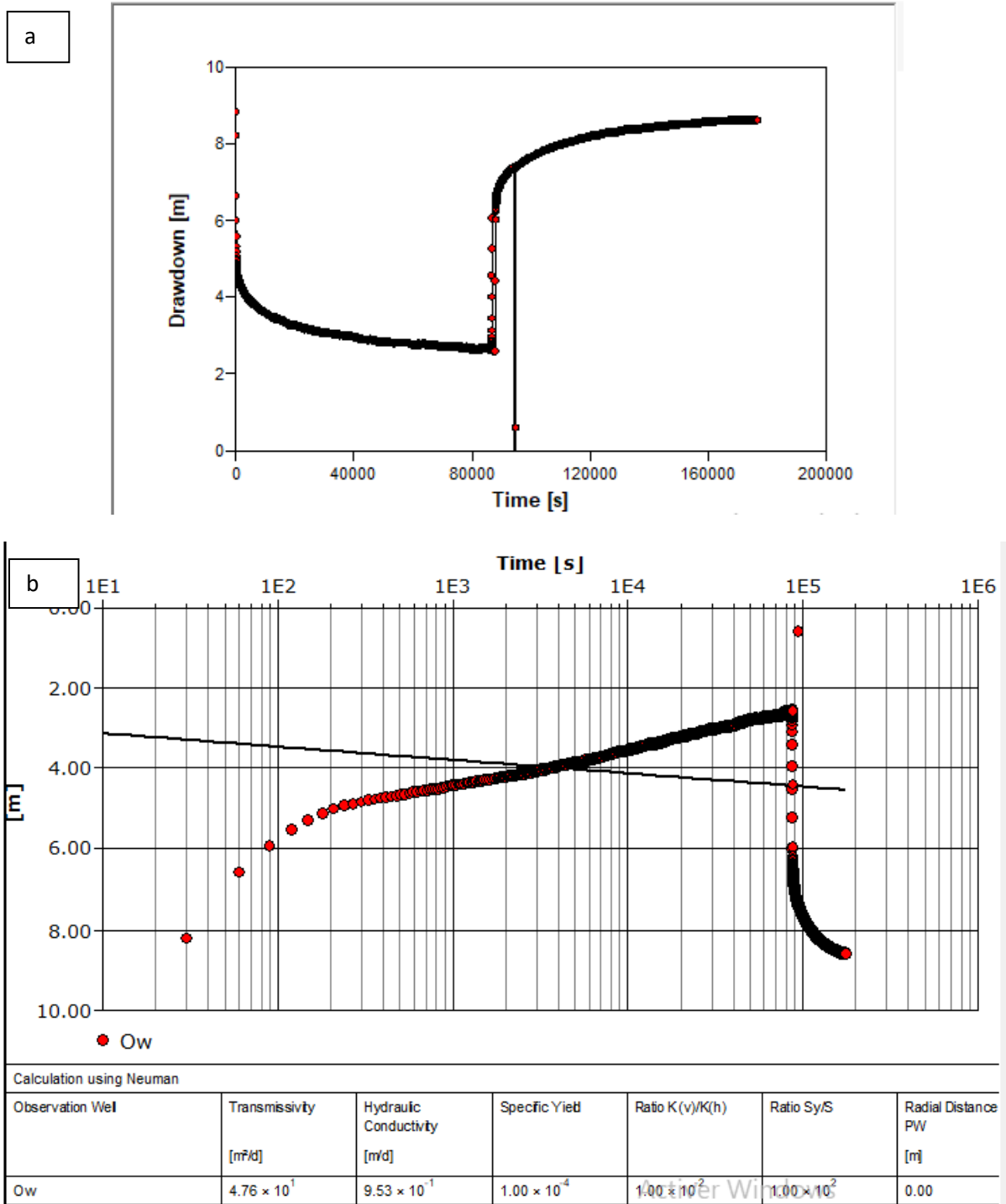


Figure 14 : Analyse graphique de l'essai de pompage de Malang par la méthode de Neuman

Les valeurs de transmissivité vont de $3,38 \times 10^{-1}$ à $47,6 \text{ m}^2/\text{jour}$. La valeur la plus élevée correspond à la région de Malang, située à l'extrémité Sud du bassin versant (voir Figure 7). Ces valeurs correspondent à un potentiel d'eau souterraine limité à modéré selon Struckmeier et Margat (1995). Ces forages sont réalisés dans les aquifères de fissures cela pourrait expliquer ces valeurs de transmissivité étant donné que les aquifères de fracture ont l'avantage de mobiliser plus d'eau.

III.3. NATURE ET CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE DU RESERVOIR ALTERITIQUE

III.3.1. Nature du réservoir altéritique

La nature du réservoir altéritique est constituée d'argile limoneux brun rougeâtre ou argilo-sableux, et sableux.

III.3.2. Conductivité hydraulique

Le taux d'infiltration correspond au taux moyen durant l'essai d'infiltration. Ce taux est élevé en début d'essai et tend vers une valeur minimale lorsque le milieu est entièrement saturé. Cette valeur minimale est la conductivité hydraulique verticale saturée qui dépend du type de sol.

La conductivité hydraulique verticale saturée varie entre 3×10^{-6} et 6×10^{-5} m/s. La gamme de variation est assez limitée, indiquant que tous les sols testés sont assez similaires (argileux-limoneux à argilo-sableux) en termes de capacité d'infiltration à saturation et que cette capacité est assez limitée. La valeur de conductivité la plus élevée a été calculée pour un sol de type sableux.

Tableau 3 : Résultats des tests d'infiltration effectués dans le bassin versant du Bidou

Site	Lat, (WGS84)	Long, (WGS84)	dh (cm)	dt (s)	I (m/s)	K _v (m/s)
Gada Bidou	7,42000	13,56641	36,375	930	$1,1 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-5}$
Bagarmi	7,42737	13,57166	26,825	1380	$1,9 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-5}$
Mosatela	7,43511	13,57900	26,525	4695	$5,6 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-6}$
Malang	7,43500	13,56354	27,90	3000	$9,3 \times 10^{-5}$	$7,5 \times 10^{-6}$
Dang	7,43396	13,54060	33,425	1240	$2,7 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-5}$
Gada Dang	7,43396	13,54060	21,40	3360	$6,4 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-6}$
Bidou	7,45323	13,59164	28,525	300	$9,5 \times 10^{-4}$	$5,8 \times 10^{-5}$
Bambi	7,52962	13,56521	24,15	1240	$2,0 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-6}$
Beka Ngaoumoukone	7,49191	13,57160	36,275	1175	$3,1 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-5}$
Bidou	7,45616	13,57884	33,275	692,5	$4,8 \times 10^{-4}$	$1,9 \times 10^{-5}$
Beka Ngaounoukone	7,47850	13,57609	19,90	2100	$9,5 \times 10^{-5}$	$3,1 \times 10^{-6}$
Beka Ngaounoukone	7,50526	13,56390	25,25	960	$2,6 \times 10^{-4}$	$8,6 \times 10^{-6}$
Tchabal Djalingo	7,54291	13,57493	40,50	2285	$1,8 \times 10^{-2}$	$6,0 \times 10^{-6}$
Mayo Mbifal	7,51568	13,56061	35,60	3665	$1,0 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-6}$
Maiborno	7,45976	13,55542	40,30	2405	$1,7 \times 10^{-2}$	$6,1 \times 10^{-6}$
Malang	7,44338	13,56682	28,50	1205	$2,4 \times 10^{-2}$	$9,0 \times 10^{-6}$
Maiborno	7,46081	13,55289	43,70	2520	$1,7 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-6}$
Gada Bidou	7,42086	13,55679	42,00	2250	$1,9 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-6}$
Malang Chefferie	7,43693	13,55585	40,90	890	$4,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-5}$

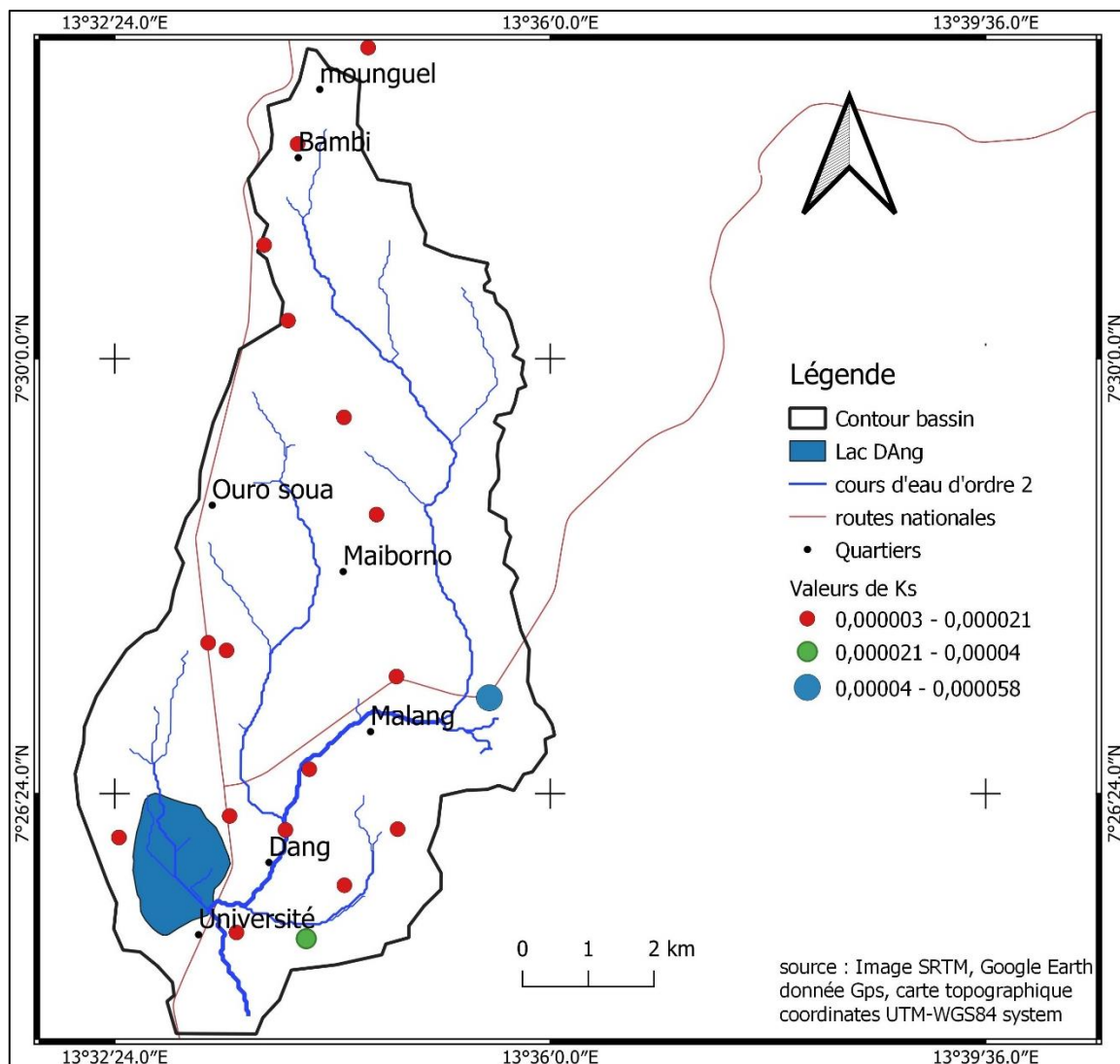


Figure 15 : Distribution de la valeur de Ks dans le bassin versant de la rivière Bidou
(Coordonnées : système UTM-WGS84)

III.4. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE LA NAPPE

Elle consiste à comprendre le fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du Bassin Versant à travers les résultats de piézométrie. Les sources sont presque absentes dans le bassin versant. Il y a de nombreux puits creusés à la main qui exploitent les aquifères d'altéritique peu profonds (Figure 16).

III.4.1. Piézométrie

Les puits suivis ont un diamètre interne de l'ordre de 1 m avec des profondeurs comprises entre 4,3 et 18,3 m. Les résultats du suivi piézométrique des 62 puits présentent une variation spatiale des niveaux piézométriques entre 1072,39 m à 1362,12 m avec une moyenne 1126,34 m. L'évolution des niveaux des pluies mensuels montre que le mois d'Août représente la période

des hautes eaux de l'aquifère à nappe libre de la localité de Ngaoundéré III^{ème} et Décembre celle des basses eaux.

III.4.2. Cartes piézométriques

Elles ont pour but de déterminer les principales directions de l'écoulement souterrain ainsi que les aires d'alimentation de la nappe (Ngouh et *al.*, 2020). Dans la présente étude, leur analyse est marquée par un écoulement presque uniforme des eaux souterraines (Figures 17). Cela est caractérisé par une direction nord-sud des lignes de courant qui sont pour la plupart convergentes. En ce qui concerne les courbes hydro-isohypses, leur analyse a porté sur la courbure des arcs de cercle.

Ainsi, les zones localisées au sud-est (à Bidou près du cours d'eau) délimitées par des courbes fermées, circulaires ou elliptiques plus ou moins régulières avec des lignes de courant convergente correspondent à une zone de drainage de la nappe.

Ces zones de drainage présentent l'avantage d'être toujours alimentées et constituent des sites favorables à l'implantation des ouvrages de captage sous réserve des propriétés hydrodynamiques (transmissivité, débit, perméabilité, coefficient d'emmagasinement) de l'aquifère. Cependant, les données obtenues restent insuffisantes pour affirmer avec certitude qu'il y'aurait une zone de drainage de la nappe.

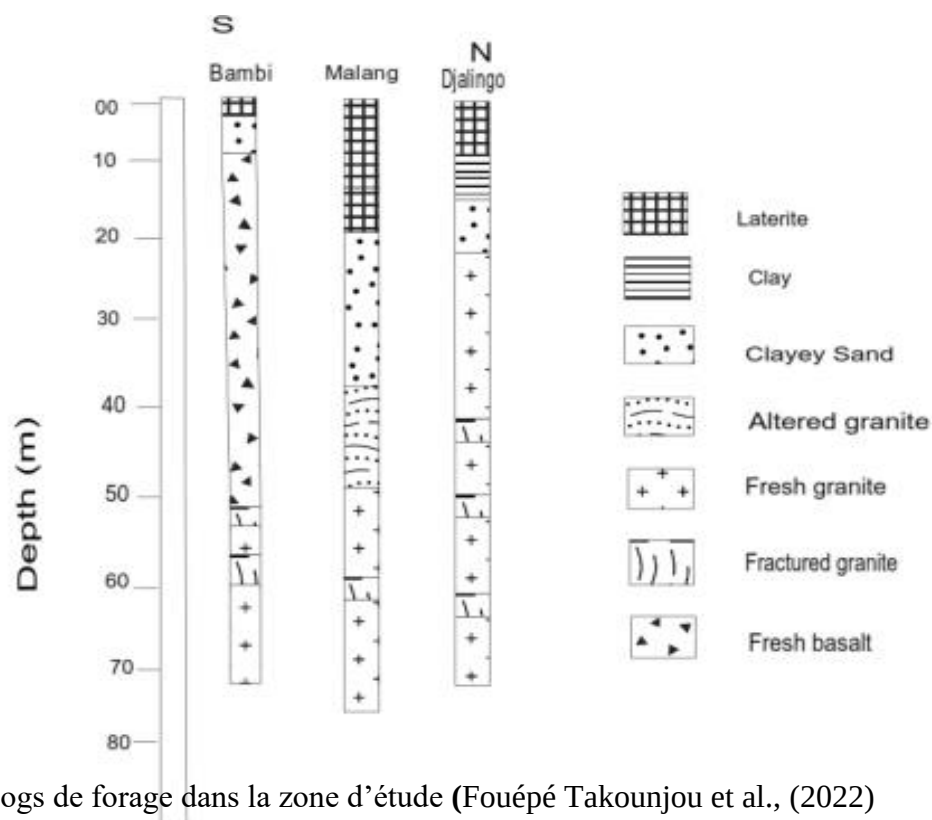


Figure 16 : Logs de forage dans la zone d'étude (Fouépé Takounjou et al., (2022))

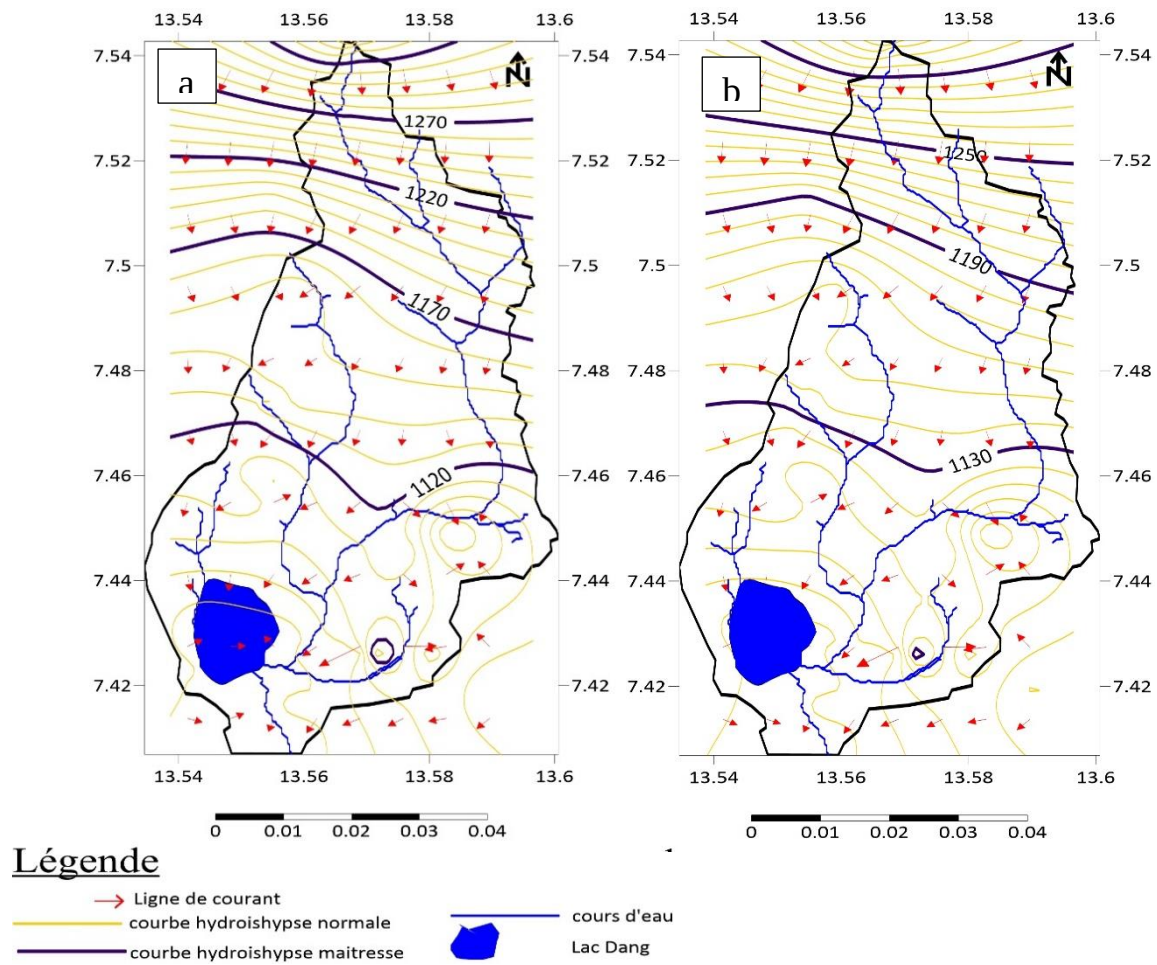


Figure 17 : Cartes piézométriques. a) piézométrie minimale de l'aquifère (Mars 2021)
b) piézométrie maximale de l'aquifère (août 2021).

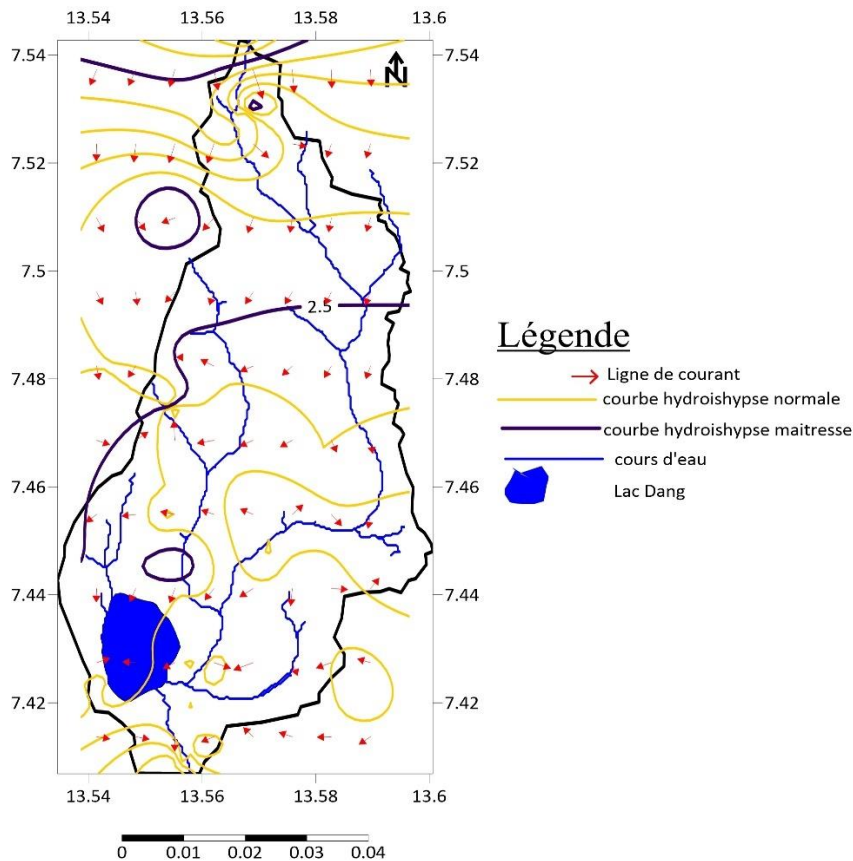


Figure 18 : Carte de fluctuation piézométrique

III.5. CARACTERISTIQUES HYDROGEOCHIMIQUES

III.5.1. Paramètres physiques

Les paramètres physiques pris en compte sont le potentiel d'hydrogène (pH), la température et la conductivité électrique (CE). Les valeurs minimales, maximales et moyennes des paramètres physico-chimiques mesurées sont indiquées dans le Tableau 6.

La valeur moyenne du pH enregistrée pour les eaux de puits (5,70) est acide tandis que celle des eaux de forages (6,84) et des eaux de surfaces (6,58) sont proche de la neutralité. Cette acidité pourrait provenir de la dissolution de certains minéraux (quartz, feldspath) contenus dans les roches granitiques mais aussi de la décomposition de la matière organique. En effet, au cours de leur trajet souterrain et du temps qu'elles passent au contact des formations granitiques rencontrées, les eaux souterraines échangent leurs ions avec ceux contenus dans ces formations. La production du dioxyde de carbone dans les couches superficielles du sol (zone non saturée) par les activités biologiques lors de la décomposition de la matière organique végétale est l'une des causes de l'acidité des sols en zone tropicale humide ce qui altère la qualité de l'eau (Matsindjou Djoumessi, 2004 ; Ahoussi *et al.*, 2008 ; Matini *et al.*, 2009). Parmi

ces échantillons seul cinq ouvrages (P9, F1, F2, F4 et F5) respectent les normes de Anor et OMS ($6,5 < \text{PH} < 9$).

Les températures des eaux de puits ($24,36^{\circ}\text{C}$) et de forage ($24,84^{\circ}\text{C}$) sont plus élevées que celle de l'eau de surface ($21,76^{\circ}\text{C}$). L'écart de dispersion de la température des eaux souterraines indiquerait une forte influence des conditions atmosphériques. Ces valeurs mesurées sont inférieures à celle préconisées par l'ANOR et OMS (25°C).

La conductivité électrique (CE) moyenne oscille entre 48 ; 143 et 29 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement pour les eaux de puits, de forages et de surfaces. Ce paramètre permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (Rodier et *al.*, 2009). Les valeurs de la conductivité de la zone d'étude sont très hétérogènes ($9 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{CE} \leq 160 \mu\text{S}/\text{cm}$). D'après la classification de Detay (1993) (Annexe 5), ces eaux ont une minéralisation faible à excessive. Ces valeurs de conductivité hydraulique sont très faibles par rapport à celles préconisées. Ces faibles conductivités électriques des eaux seraient à mettre en relation avec le temps de résidence très bref des eaux dans le substratum rocheux et les sols.

Tableau 4 : Variations statistiques des paramètres physiques

	Eau de puits			Eaux de forages			Eaux de surfaces		
Paramètres	T	PH	CE	T	PH	CE	T	PH	CE
Unités	($^{\circ}\text{C}$)	/	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	($^{\circ}\text{C}$)	/	($\mu\text{S}/\text{cm}$)	($^{\circ}\text{C}$)	/	($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Min	20,40	5,20	11,00	22,50	5,80	27,00	19,50	5,40	11,00
Max	26,20	7,60	168,00	26,00	7,40	329,00	24,10	7,50	117,00
Moy	24,36	5,70	48,60	24,84	6,84	143,00	21,76	6,58	29,08
Med	24,70	5,25	20,00	25,50	7,20	118,00	21,65	6,70	21,50
ET	1,60	0,79	57,35	1,47	0,65	120,70	1,37	0,52	28,53

pH : Potentielle d'hydrogène ; **T** : Température ; **CE** : Conductivité électrique ; **Min** : Minimum ; **Max** : Maximum ; **Moy** : Moyenne ; **Med** : Médiane ; **ET** : Ecart Type,

III.5.2. Paramètres chimiques

Les paramètres chimiques pris en comptes dans la présente étude pour évaluer la qualité des eaux souterraines de l'aquifère quaternaire sont les cations majeurs, les anions majeurs et les éléments traces.

III.5.2.1. Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} et K^{+})

Les alcalino-terreux sont représentés par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Les teneurs en calcium varient de 0,53 mg/l à 18,80 mg/l avec une moyenne de 4,22 mg/l ; 13,82 mg/l et 2,56 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface. Les teneurs

magnésiques (Mg^{2+}) varient de 0,10 mg/l à 6,43 mg/l avec une moyenne de 1,01 mg/l, 4,91 mg/l et 1,11 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface (Tableau 7).

Les alcalins sont représentés par les ions Na^+ et K^+ . Les teneurs en Sodium varient de 0,3 et 43,9 mg/l avec une moyenne de 2,50 mg/l ; 14,86 mg/l et 1,11 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface. Les teneurs en potassium varient de 0,1 et 5 mg/l avec une moyenne de 0,49 mg/l ; 2,78 mg/l et 0,49 mg/l ; respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface.

La somme des équivalents cations (TZ^+) varie entre 0,05 et 3,49 méq/l pour une moyenne arithmétique de 0,6 méq/l (Tableau 7). L'ordre décroissant de ces cations sont : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$.

Ces différentes valeurs peuvent s'expliquer par le temps de séjour des eaux dans les formations rocheuses beaucoup plus longues dans le cas des eaux souterraines que celles de surfaces où le renouvellement est permanent. Toutefois, les valeurs des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) obtenues sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS et l'ANOR.

III.5.2.2 Anions majeurs (HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et Cl^-)

Les concentrations en bicarbonate (HCO_3^-) varie entre 3,1 et 212 mg/l pour une moyenne arithmétique de 17,05 mg/l ; 107,92 mg/l et 16,75 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface (Tableau 7). La teneur en ion chlorure quant à lui fluctue entre 0,02 et 16,4 mg/l pour une moyenne arithmétique de 1,79 mg/ ; 0,16 mg/l et 0,05 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface (Tableau 7).

Les teneurs en ions sulfates (SO_4^{2-}) varie entre 0,0 et 0,9 mg/l pour une moyenne arithmétique de 0,08 mg/l ; 0,20 mg/l et 0,01 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface. Cependant les ions nitrates (NO_3^-) varient entre 0,0 et 44,4 mg/l pour une moyenne arithmétique 5,22 mg/l ; 0,0 mg/l et 0,15 mg/l respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface (Tableau 7).

La somme d'équivalents anions (TZ^-) oscille entre 0,06 et 3,55 méq/l pour une moyenne arithmétique de 0,62 méq/l (Tableau 6). L'ordre décroissant de ces anions sont : $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$.

Ces concentrations élevées en HCO_3^- dans les eaux de forage seraient dues au temps de séjour de l'eau dans les formations rocheuses profondes beaucoup plus longue que dans le cas de l'eau

de puits et de surface. Dans le cas du Cl^- et du NO_3^- , les eaux du puits P8 ont une concentration la plus élevée (44.4 mg/l pour le NO_3^- , et 16.4 mg/l pour le Cl^-). Ceci serait dû à une forte concentration d'habitation autour de ce puits (présence de latrine non loin) et à l'action de l'homme, par l'utilisation courante du clore par les populations pour rendre l'eau potable.

III.5.2.3 Balance ionique

Comme mentionné dans le chapitre précédent, la balance ionique a été immédiatement calculé pour vérifier si les résultats obtenus au laboratoire sont acceptables. La figure montre une claire corrélation entre la somme des anions et des cations dans le bassin versant, avec une corrélation linéaire de : $y = 1,0043x - 0,0023$ avec $R^2 = 0,999 \sim 1$.

Cette corrélation illustrée dans la figure ci-dessous prouve que les résultats sont acceptables.

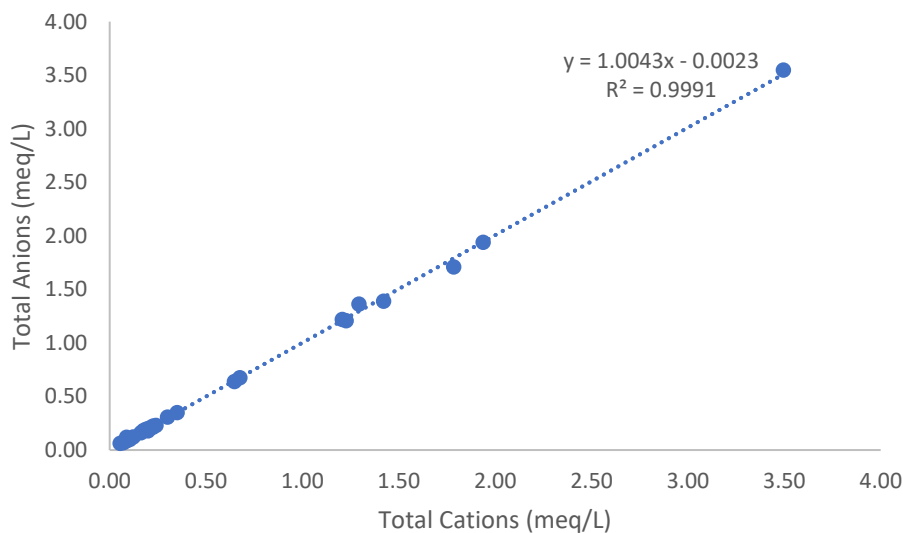


Figure 19 : Fiabilité de la technique d'analyse des échantillons d'eau mesurée par équilibre de charge entre la somme des cations et les anions.

III.5.2.4. Autres éléments chimiques (Fe , Mn , NH_4^+ , F^-)

D'autres éléments chimiques pris en considération dans le cadre de cette étude sont : le fer (Fe), le manganèse (Mn), l'Ammonium (NH_4^+) et le fluor (F^-).

Les teneurs en ions Fe^{2+} varient entre 0,00 mg/l et 1,04 mg/l pour une moyenne arithmétique de 0,18 mg/l ; 0,04 mg/l et 0,34 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface. Les teneurs en manganèse (Mn) varient entre 0,00 mg/l et 0,65mg/l pour une moyenne arithmétique de 0,09 mg/l ; 0,03 mg/l et 0,07 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface. Les teneurs en ions NH_4^+ varient entre 0,00 mg/l et 0,04 mg/l pour une moyenne arithmétique de 0,00 mg/l pour de l'eau de puits ; ils sont

inexistants dans l'eau de forage et l'eau de surface. Les teneurs en ions fluorures (F^-) varient entre 0,00 mg/l et 2,13 mg/l pour une moyenne arithmétique de 0,14 mg/l ; 0,60 mg/l et 0,04 mg/l, respectivement pour de l'eau de puits, l'eau de forage et l'eau de surface.

L'ordre décroissant de ces éléments sont donc : $Fe^{2+} > F^- > Mn^{2+} > NH_4^-$.

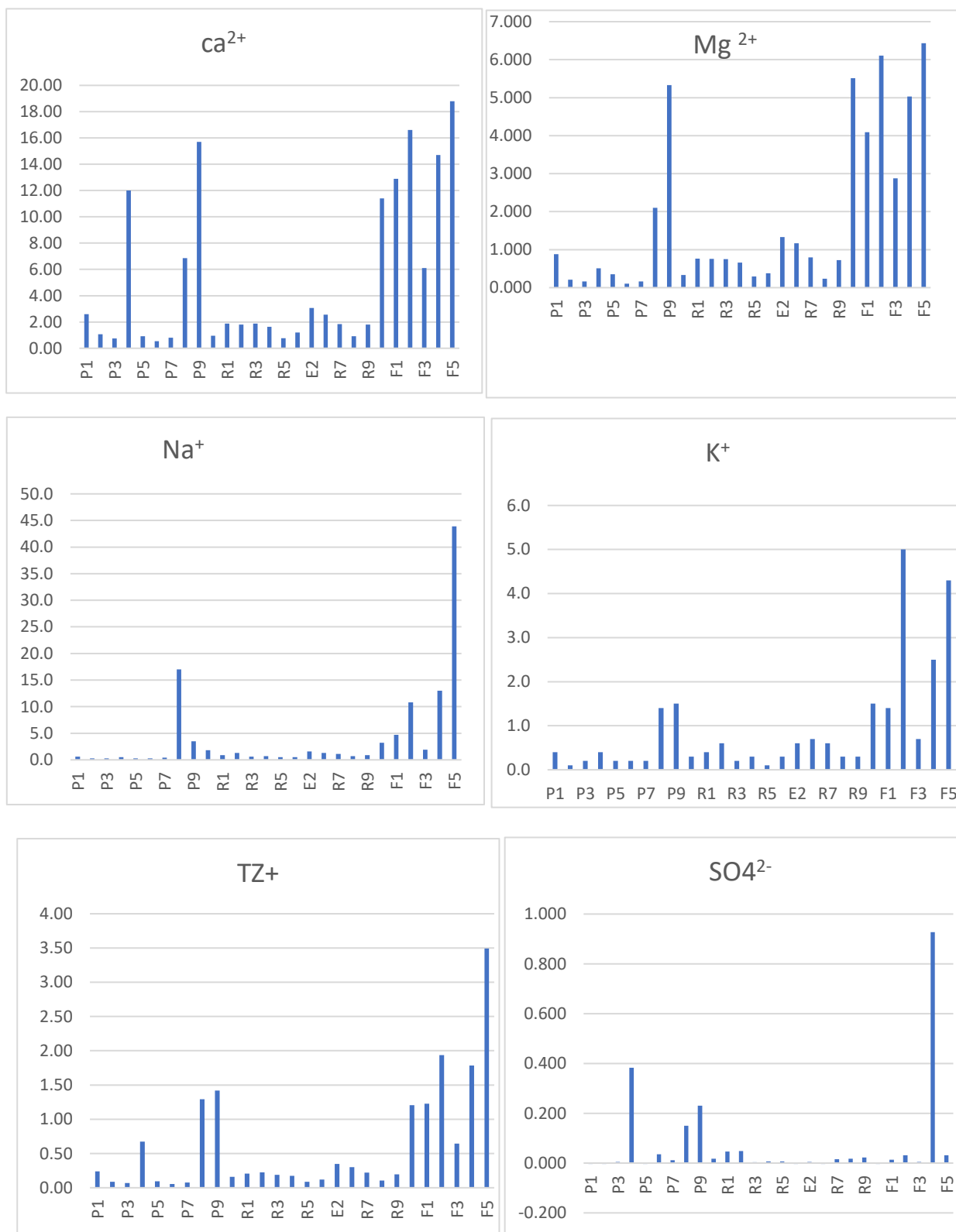
Tableau 5 : Variation statistique des paramètres chimiques (ions majeurs)

Eaux de Puits										
Paramètres	HCO_3^-	K^+	Na^+	Cl^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	TZ+	TZ-
Unités	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(meq/l)	(meq/l)
Min	3,10	0,10	0,30	0,05	0,10	0,53	0,00	0,00	0,05	0,06
Max	80,70	1,50	17,00	16,40	5,33	15,70	0,38	44,40	1,42	1,39
Moy	17,05	0,49	2,50	1,79	1,01	4,22	0,08	5,22	0,42	0,42
Med	5,40	0,25	0,45	0,07	0,34	1,01	0,01	0,08	0,13	0,13
ET	24,93	0,52	5,20	5,14	1,63	5,48	0,13	13,88	0,53	0,54
Eaux de forage										
Paramètres	HCO_3^-	K^+	Na^+	Cl^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	TZ+	TZ-
Unités	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(meq/l)	(meq/l)
Min	38,22	0,70	1,90	0,02	2,88	6,11	0,01	0,00	0,65	0,64
Max	212,00	5,00	43,90	0,45	6,43	18,80	0,93	0,01	3,49	3,55
Moy	107,92	2,78	14,86	0,16	4,91	13,82	0,20	0,00	1,82	1,81
Med	101,00	2,50	10,80	0,14	5,03	14,70	0,03	0,00	1,78	1,71
ET	65,32	1,84	16,84	0,17	1,46	4,84	0,41	0,00	1,07	1,09
Eaux de surface										
Paramètres	HCO_3^-	K^+	Na^+	Cl^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	TZ+	TZ-
Unités	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(meq/l)	(meq/l)
Min	5,80	0,10	0,50	0,02	0,24	0,76	0,00	0,00	0,09	0,10
Max	71,80	1,50	3,20	0,15	5,51	11,40	0,05	1,19	1,21	1,22
Moy	16,75	0,49	1,11	0,05	1,11	2,56	0,01	0,15	0,28	0,28
Med	11,70	0,35	0,90	0,04	0,75	1,83	0,01	0,07	0,20	0,20
ET	17,87	0,37	0,75	0,04	1,42	2,85	0,02	0,33	0,30	0,30

Tableau 6 : Variation statistique des paramètres chimiques (éléments traces).

Paramètres	Eaux de puits				Eaux de forages				Eaux de surfaces			
	Fe	Mn	NH_4	F	Fe	Mn	NH_4	F	Fe	Mn	NH_4	F
Unités	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Min	0,00	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,10	0,09	0,01	-0,01	0,01
Max	1,04	0,65	0,04	2,13	0,14	0,10	0,01	2,13	1,04	0,19	0,01	0,14
Moy	0,18	0,09	0,00	0,14	0,04	0,03	-0,01	0,60	0,34	0,07	-0,01	0,04
Med	0,11	0,045	-0,01	0,035	0,02	0,00	-0,01	0,11	0,28	0,04	-0,01	0,04
ET	0,23	0,13	0,01	0,41	0,06	0,05	0,01	0,88	0,27	0,06	0,01	0,03

Min : Minimum ; **Max** : Maximum ; **Moy** : Moyenne ; **Med** : Médiane ; **ET** : Ecart Type



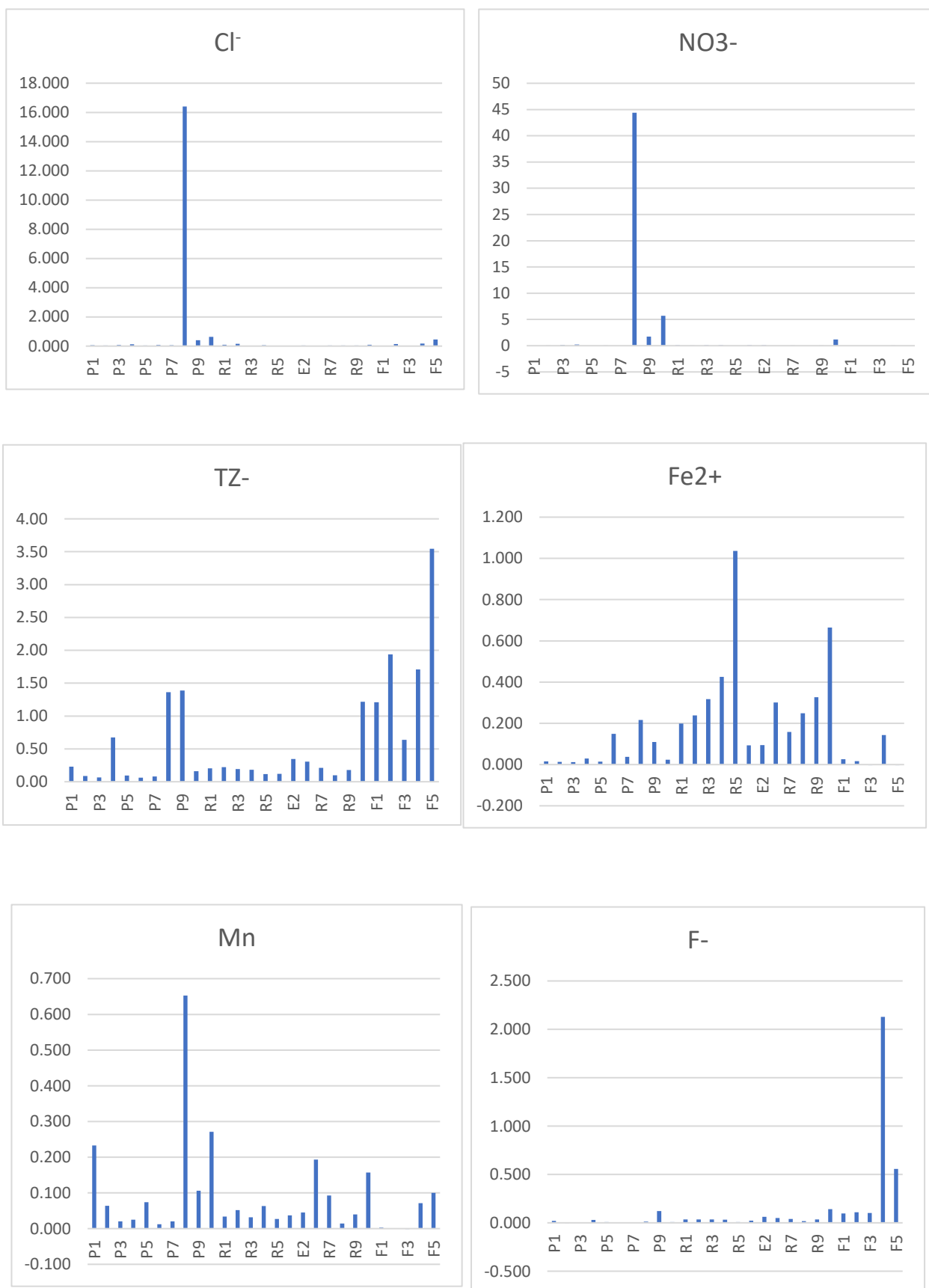


Figure 20 : Variation spatiale des paramètres chimiques.

Tableau 7 : Norme d'OMS des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

Elément	Norme OMS	Norme ANOR
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	250	/
Cl ⁻ (mg/l)	250	≤200
SO ₄ ⁻ (mg/l)	250	≤250
NO ₃ ⁻ (mg/l)	50	≤50
Ca ²⁺ (mg/l)	100	
Mg ²⁺ (mg/l)	50	≤50
Na ⁺ (mg/l)	150	≤150
K ⁺ (mg/l)	12	≤12
NH ₄ ⁺ (mg/l)	0,5	≤0,5
F ⁻ (mg/l)	1,5	/
PH	6,5<PH<9,5	6,5<PH<9
Conductivité électrique (µS/cm)	2500	1000

III.5.2.5. Faciès hydrogéochimiques des eaux souterraines

Les résultats d'analyse des éléments majeurs intégrés dans le diagramme de piper (1944) montrent que, le triangle des cations est largement dominé par les ions calcium suivi du sodium, et du côté du triangle des anions, ce sont les ions bicarbonates, nitrates et chlorures qui sont représentatifs (Figure 21). Dans l'ensemble, l'ordre de grandeur décroissant des éléments majeurs des eaux du bassin versant de Bidou est le suivant (Figure 21) : **HCO₃⁻ > Ca²⁺ > NO₃⁻ > Na⁺ > Mg²⁺ > Cl⁻ > K⁺ > SO₄²⁻** avec :

Eaux de puits : : HCO₃⁻ > NO₃⁻ > Ca²⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > Mg²⁺ > K⁺ > SO₄²⁻

Eaux de forage : HCO₃⁻ > Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻

Eaux de surface : HCO₃⁻ > Ca²⁺ > NO₃⁻ > Na⁺ > Mg²⁺ > Cl⁻ > K⁺ > SO₄²⁻

La classification hydrogéochimique à travers le diagramme de Piper (Figure 22, 23, 24) met en évidence quatre faciès :

- un faciès **bicarbonaté calcique et magnésien** (HCO₃⁻ Ca²⁺ Mg²⁺) qui est le plus représenté 87%. Ce faciès corrobore avec la nature silicatée des roches drainées dont l'hydrolyse met en solution les bicarbonates et le calcium ;
- un faciès **chloruré sodique et potassique** (NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, K⁺) qui représente 7% ; il est présent uniquement dans les ouvrages P8 et P10. La présence de ce groupe d'ions dans cette eau pourrait avoir deux origines : d'un apport anthropique par l'utilisation de l'eau de javel afin de rendre l'eau potable avant la consommation et de l'autre lié à l'utilisation des engrais et à la décomposition de la matière organique qui sert à enrichir le sol pour favoriser le rendement des cultures ;

- un faciès **bicarbonaté calcique** : présent uniquement au niveau de l'ouvrage P4 ;.
- un faciès **bicarbonaté sodique et potassique** : présent uniquement au niveau de l'ouvrage F5.

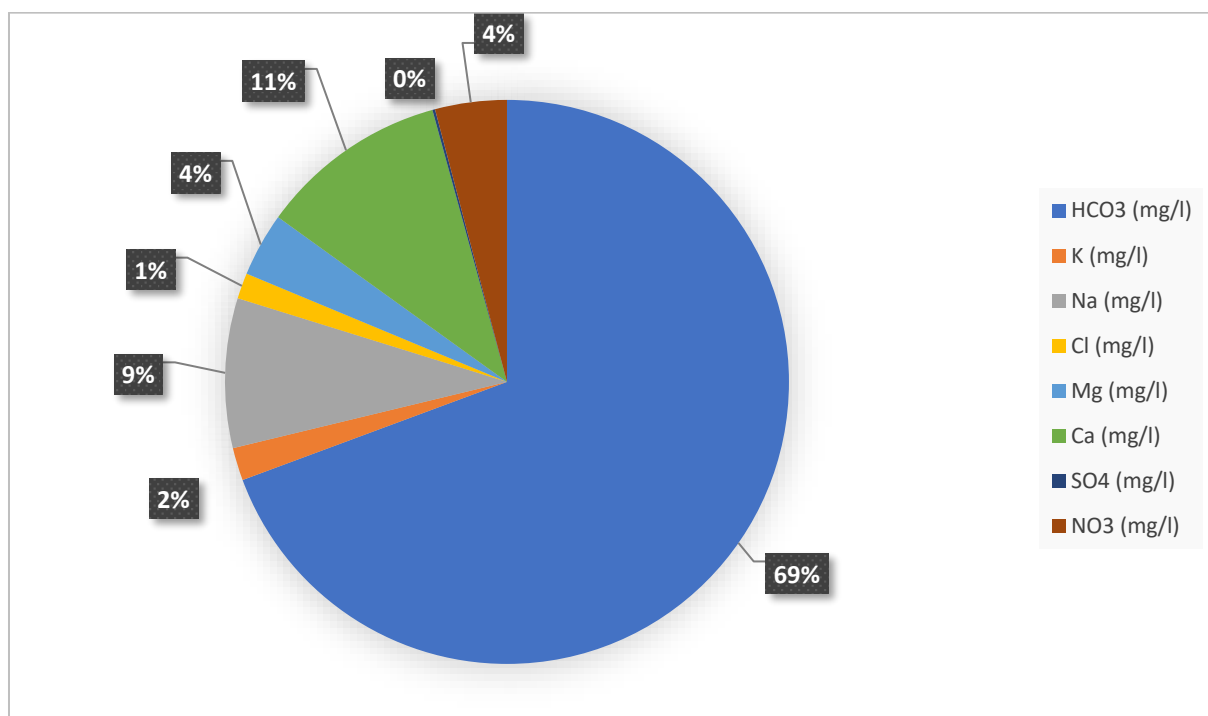


Figure 21 : Répartition spatiale des éléments chimiques dans l'ensemble des eaux du bassin versant de Bidou.

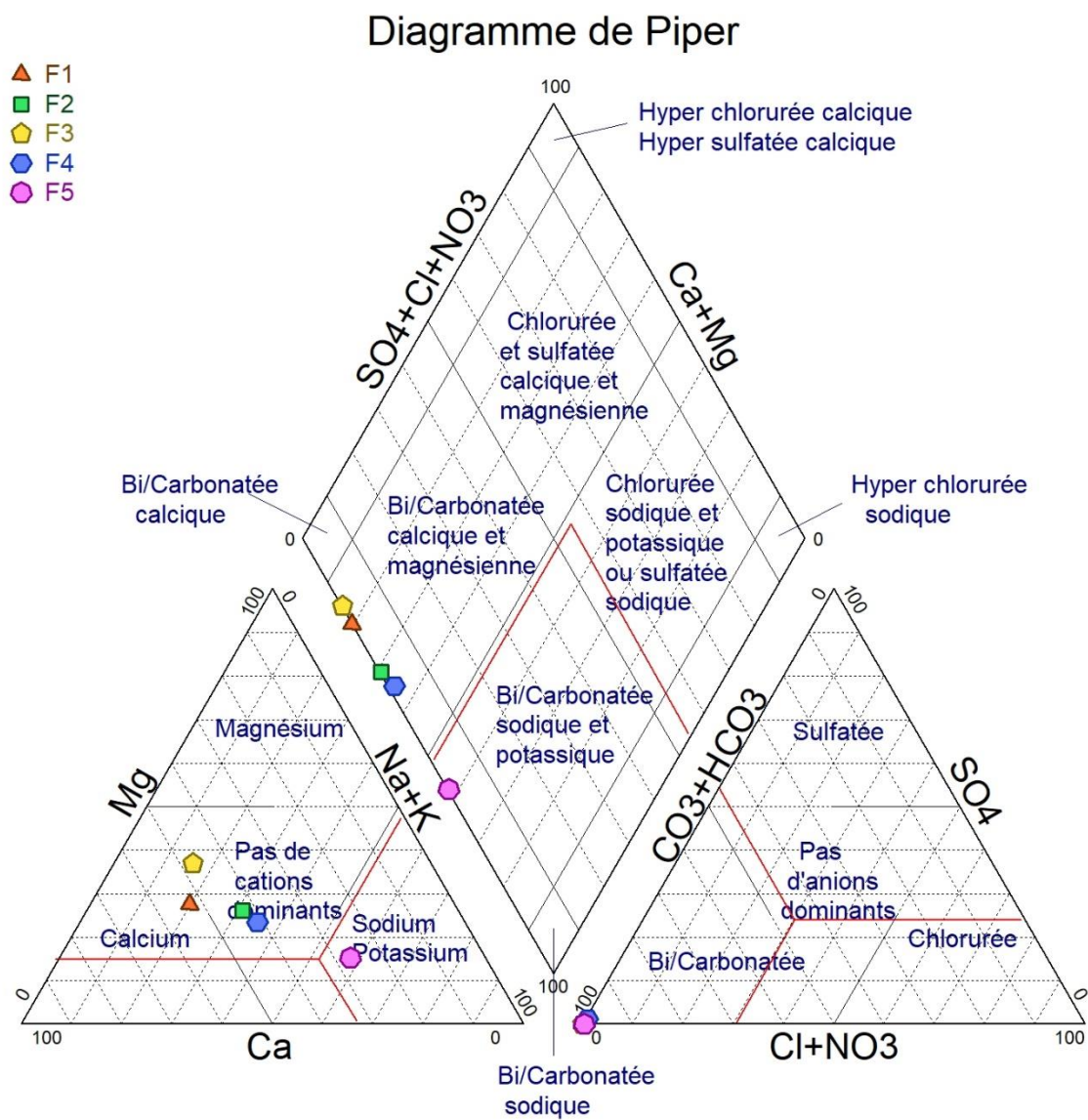


Figure 22 : Diagramme de Piper des eaux de forage.

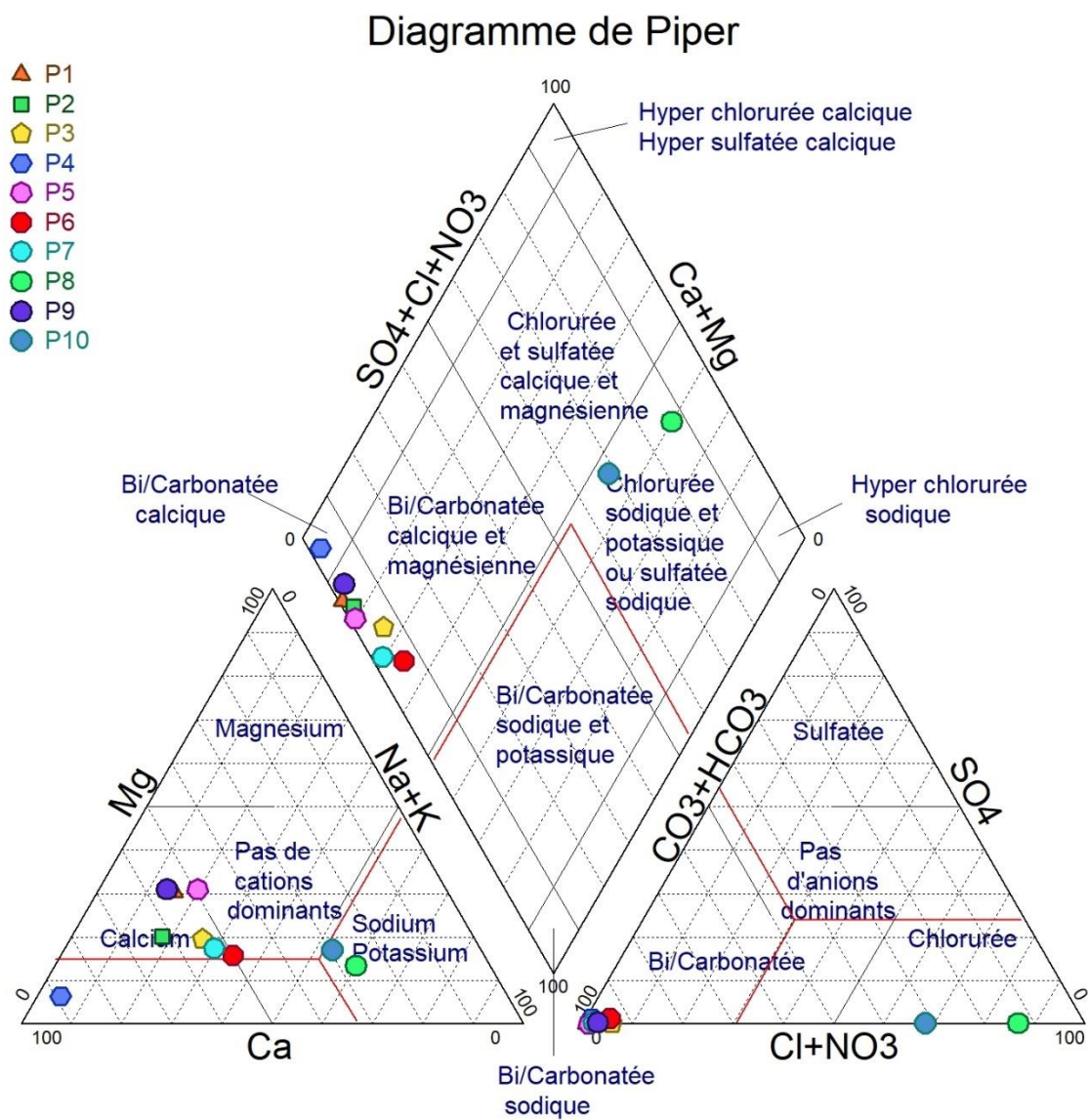


Figure 23 : Diagramme de Piper des eaux de puits.

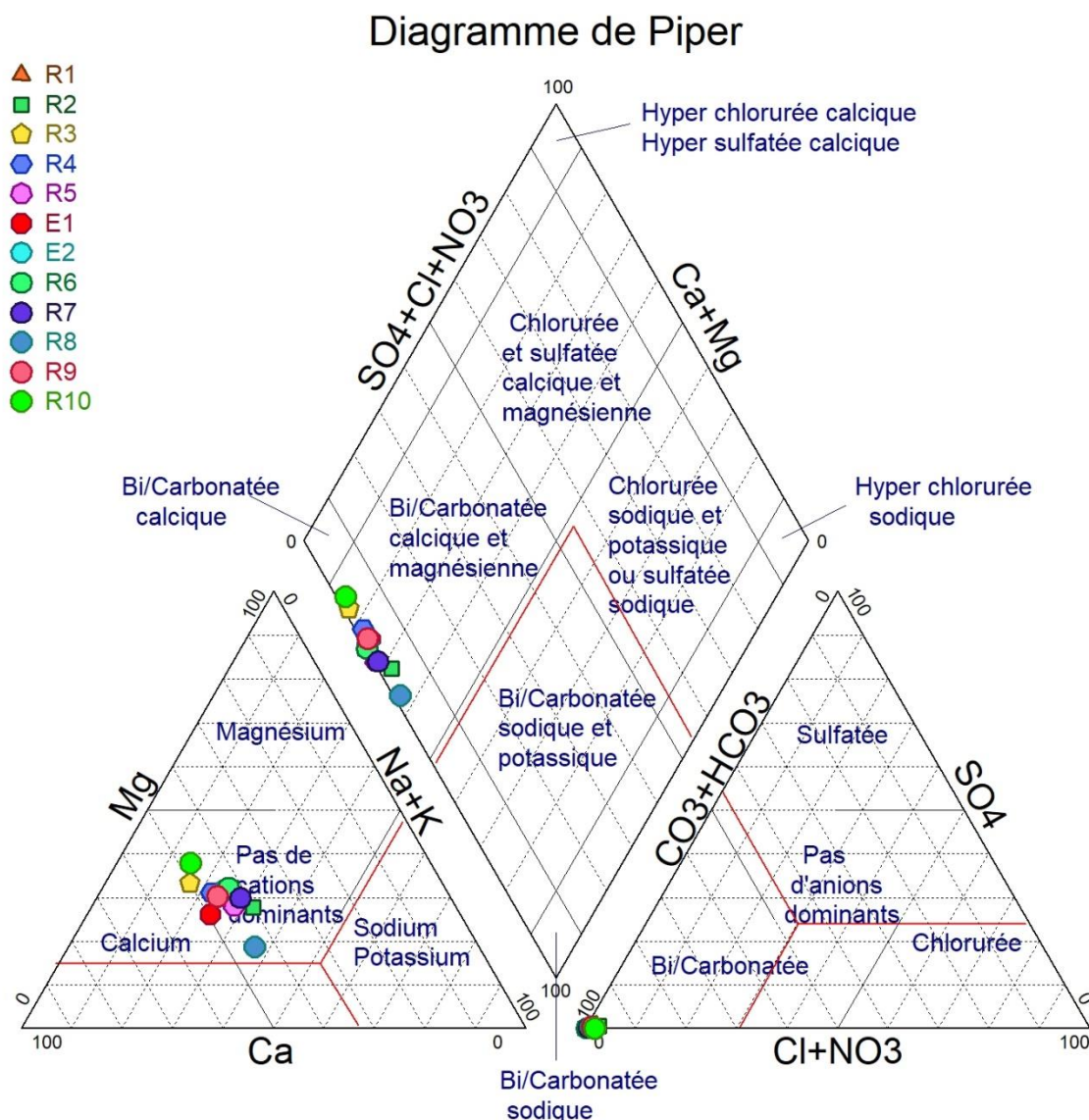


Figure 24 : Diagramme de Piper des eaux de surface.

III.5.3. Corrélations entre les éléments chimiques et l'origine des éléments dissous dans les eaux souterraines de la zone d'étude

III.5.3.1. Corrélations entre éléments chimiques

Dans le but de comprendre le fonctionnement hydrochimique des eaux souterraines dans le bassin versant de Bidou, les données physicochimiques et chimiques ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales (ACP) à partir de seize (16) paramètres ; Ceci dans l'optique de mieux apprécier les associations entre les différentes variables.

L'analyse en composantes principales est une méthode d'analyse statistique de données qui permet de rechercher les relations entre les variables chimiques. Elle regroupe celles qui présentent un comportement semblable afin d'avoir une idée sur l'évolution chimique des nappes.

La **matrice de corrélation** de Person effectuée à partir de 16 paramètres présente des corrélations négatives et positives et permet de retenir les éléments corrélés deux à deux avec un coefficient de corrélation (r).

Au regard des résultats de ce tableau, on remarque que :

- Le pH est corrélé à la conductivité électrique (0,53), au bicarbonate (0,60), au magnésium (0,66) et au calcium (0,64) ;

- La conductivité électrique est bien corrélée au bicarbonate (0,84), au sodium (0,89), au magnésium (0,76), au calcium (0,79) et enfin au potassium (0,67) ;

- le bicarbonate est bien corrélé au potassium (0,90), au sodium (0,83), au magnésium (0,90) et au calcium (0,91) ;

- le potassium est bien corrélé au sodium (0,77), au magnésium (0,87), au calcium (0,84) ;

- le sodium est corrélé au magnésium (0,65) et au calcium (0,66) bicarbonate ;

- le magnésium est bien corrélé au calcium (0,92) ;

- de très forte corrélations entre l'ion chlorure (Cl^-) et les ions NO_3^- (0,99), entre l'ions Cl^- et le manganèse (0,86) ;

- le manganèse est bien corrélé au NO_3^- (0,88) ;

- le sulfate est bien corrélé aux ions F^-

Ces bonnes corrélations inter éléments signifient que certains des éléments sus cités ont des origines communes (Abderamane, 2012 ; Nsangou, 2017) Ces différentes corrélations traduisent l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude.

Tableau 8 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du bassin versant de Bidou

	T (°C)	PH	EC	HCO3	K	Na	Cl	Mg	Ca	Fe	Mn	SO4	NO3	NH4	F
T (°C)	1,00														
PH	-0,29	1,00													
EC	0,34	0,53	1,00												
HCO3	0,22	0,60	0,84	1,00											
K	0,17	0,49	0,67	0,90	1,00										
Na	0,34	0,35	0,89	0,83	0,77	1,00									
Cl	0,17	-0,12	0,32	-0,07	0,10	0,31	1,00								
Mg	0,12	0,66	0,76	0,90	0,87	0,65	0,05	1,00							
Ca	0,20	0,64	0,79	0,91	0,84	0,66	0,07	0,92	1,00						
Fe	-0,61	0,11	-0,12	-0,17	-0,19	-0,17	0,02	-0,08	-0,18	1,00					
Mn	0,12	-0,12	0,32	-0,07	0,05	0,27	0,86	0,05	0,03	0,03	1,00				
SO4	0,25	0,31	0,43	0,32	0,26	0,21	0,09	0,33	0,47	-0,10	0,05	1,00			
NO3	0,16	-0,14	0,30	-0,10	0,07	0,28	0,99	0,03	0,05	0,02	0,88	0,08	1,00		
NH4	0,19	-0,37	-0,11	-0,25	-0,22	-0,09	0,23	-0,26	-0,19	-0,17	0,32	-0,01	0,29	1,00	
F	0,31	0,35	0,54	0,50	0,43	0,42	-0,05	0,48	0,48	-0,06	-0,04	0,87	-0,07	-0,16	1,00

III.5.3.2. Origines des paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus à partir de la matrice de corrélation (MC), et du faciès hydrogéochimique présentés plus haut montre que les paramètres physico-chimiques étudiés dans ces eaux souterraines ont trois principales origines que sont : géogénique, anthropique et mixte.

Le milieu aquifère de la zone d'étude est contrôlé par les phénomènes chimiques que sont l'hydrolyse. Au cours de l'hydrolyse des minéraux primaires, les bicarbonates, les cations majeurs et la silice sont libérés suivant l'équation (1).

Au cours de cette réaction, l'ion HCO_3^- et les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) majeurs seraient libérés par la roche réservoir, notamment pendant l'hydrolyse des plagioclases et les pyroxènes contenus dans les roches granitiques.

Equation d'hydrolyse :

Minéraux primaires + CO_2 + H_2O $\rightarrow$ HCO_3^- + minéraux secondaires + cations + silice (1)

$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

Anorthite **kaolinite**

$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + 2\text{Mg}^{2+} + 4\text{OH}^-$

Forstérite

$2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Na}^+ + 4\text{SiO}_2$

Albite **Kaolinite**

Les ions nitrates fortement représentés dans les eaux de puits de la zone d'étude, pourraient provenir de la dégradation microbienne (décomposition de la matière végétale et animale), de l'oxydation de l'azote atmosphérique, mais aussi et surtout des activités anthropiques (élevage, engrais, urbanisation, etc.) (Nana, 2015).

Les ions chlorures présent en grande concentration (16,4 mg/l) dans l'ouvrage P8 serait dû à l'action de l'homme par l'utilisation de l'eau de javel afin de rendre l'eau potable ; mais aussi par l'utilisation des engrais chimiques (chlorure de potassium) à des fins agricoles.

L'origine des ions dissous dans ces eaux est contrôlée par le contact eau-roche (Abderamane., 2012, Mfonka *et al.*, 2015).

La présence des traces de fer dans les eaux serait liée à l'hydrolyse des minéraux riches en fer comme les biotites, les pyroxènes contenus dans les formations du socle cristallines (Njueya *et al.*, 2012). Une fois libéré, le fer se trouve sous sa forme dissoute (Fe^{2+}) et au contact de l'air, s'oxyde sous forme hydraté insoluble (Fe^{3+}) qui a une couleur rouge rouille, La teneur en fer dans les eaux serait liée à l'érosion des sols (Tchotsoua *et al.*, 1998). La présence du fer dans les eaux analysées serait liée à la nature ferralitique du sol rencontrée par la nappe lors de son battement.

Le fluorure est minéral des roches ferromagnésiennes. Sa mise en solution serait due à la lixiviation des sols ferralitiques de la zone d'étude.

III.6. MODELE CONCEPTUEL DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE BIDOU

Les zones de socle sont généralement caractérisées par la présence de deux types d'aquifères : les aquifères superficiels dans les altérites et les aquifères profonds dans les fractures (Lachassagne *et al.*, 2015). L'Adamaoua n'échappe pas à cette règle et montre que les aquifères superficiels sont situés entre 2 et 18 m de profondeur et les aquifères fracturés plus profonds entre 11 et 74 m (Njueya *et al.*, 2021). Dans la zone d'étude, des diagraphies lithologiques de forages productifs (Figure 17) permettent d'identifier les deux niveaux aquifères : (1) un niveau superficiel situé entre 1 et 22 m sous la surface du sol dans les altérites ; (2) un niveau profond situé en dessous de 25 m de profondeur dans les roches fracturées. Les deux niveaux aquifères sont séparés par une couche semi-perméable à imperméable de textures argileuses sur les profils basaltiques et argilo-sableuses sur les profils granitiques (Figure 17). L'aquifère superficiel est capté principalement par des puits peu profonds (traditionnels ou modernes) mais aussi par quelques forages et le niveau profond n'est capté que par des forages

dont la profondeur est comprise entre 25 et 90m. Ces aquifères de socle constituent un important réservoir d'eau dans le monde.

Dans les puits, les niveaux piézométriques varient de 1,22 à 13,56 m avec une moyenne de 9,51 m. La position du niveau piézométrique est située entre les altérites. Ceci indique que les altérites ont une épaisseur saturée moyenne de l'ordre de 10 m. La surface piézométrique épouse sensiblement la forme du relief, Cela s'observe au niveau des ouvrages P7 (1087) et P9 (1095) situés respectivement à côté du lac de Dang et du cours d'eau Bidou qui ont des niveaux piézométriques proche de la surface du sol. Cette surface piézométrique est donc reliée au réseau hydrographique qui constitue l'aire d'émergence de la nappe. Le modèle conceptuel qui découle de l'ensemble de ces observations est ainsi synthétisé sur la figure 26.

La surface piézométrique semble être parallèle à la topographie (Figure 26). La profondeur du niveau statique montre une corrélation ($r = 0,99$) avec la cote topographique du terrain (Figure 26). Cette corrélation n'est pas suffisante pour admettre que le niveau statique peut être calculé en tout point directement à partir de la cote du terrain. Les interprétations précédentes ont indiqué des faibles variations à proximité du cours d'eau, Par ailleurs, le niveau piézométrique est plus profond au niveau des points haut. A cet effet, la surface piézométrique peut donc être modélisée.

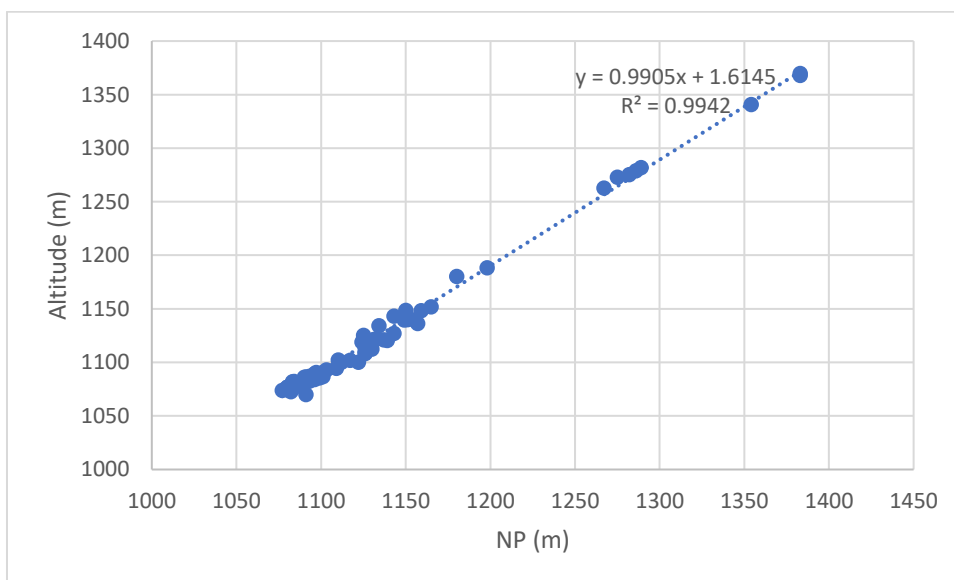


Figure 25 : Relation cote topographique et niveau piézométrique

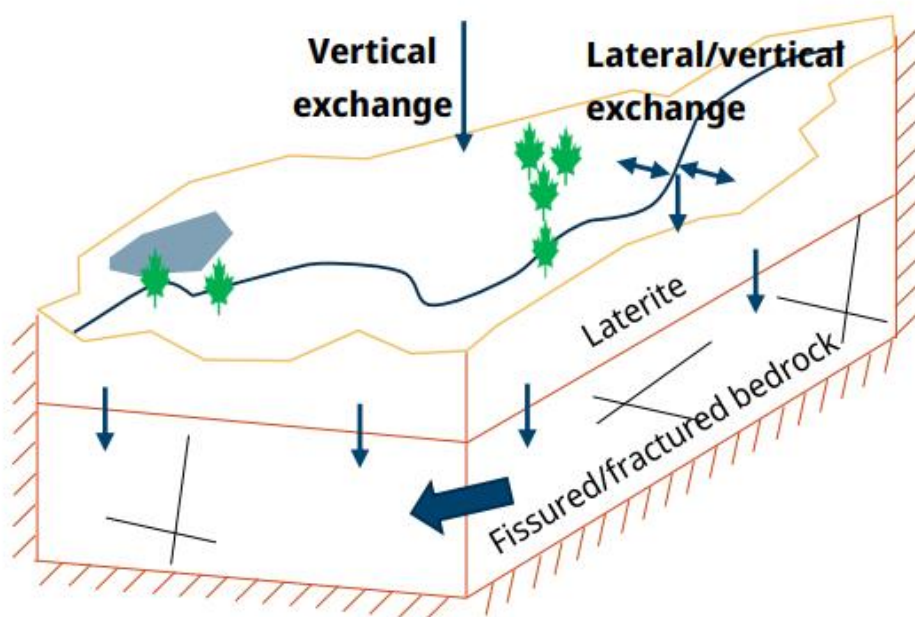
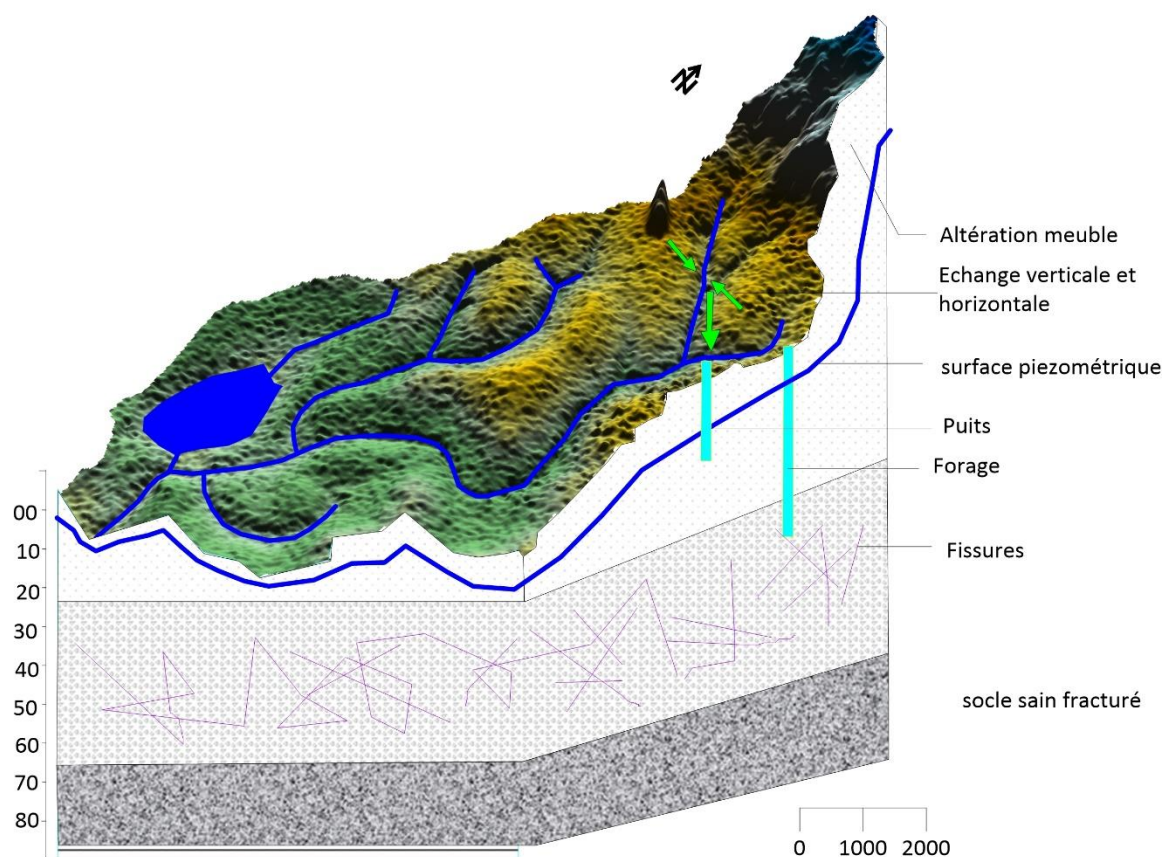


Figure 26 : Modèle 3D de l'aquifère d'altérite du bassin versant de Bidou

CONCLUSION GENERALE

En résumé, le bassin versant de Bidou est situé dans la commune d'arrondissement de Ngaoundéré III. Il est caractérisé par une précipitation moyenne annuelle de 1554,63 mm/an pour la période allant de 1981 à 2022. La température moyenne annuelle est de 28,55°C. Le climat quant à lui est de type soudano guinéen avec deux principales saisons : une saison de pluie qui s'étale d'Avril en Octobre et une saison sèche de Novembre à Mars.

Le Bidou, est le principal cours d'eau qui traverse la commune de Ngaoundéré 3 et qui est alimenté par deux affluents de sa rive droite : la rivière Malang, qui draine la partie urbaine (Dang) du bassin versant, et la rivière Gada-Bidou, qui alimente principalement le lac Dang. Du point de vue hydrogéologique, le bassin versant du Bidou abrite une nappe libre avec des passages semi-perméables à imperméable de textures argileuses sur les profils basaltiques et argilo-sableuses sur les profils granitiques.

L'examen des cartes piézométriques met en évidence un écoulement des eaux souterraines convergeant avec une direction allant du Nord vers le Sud. Vers le Sud-Est du bassin on localise des courbes fermées, circulaires ou elliptiques plus ou moins régulières avec des lignes de courant convergentes qui correspondent à une zone de drainage de la nappe.

L'interprétation des données des essais de pompage effectués dans la région a permis de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Les valeurs de transmissivité sont de l'ordre de $3,38 \times 10^{-1}$ à 47,6 m²/jour.

L'étude hydrochimique des eaux du bassin versant de Bidou montre que la répartition spatiale des éléments chimiques est fortement liée à la lithologie de la nappe, suite à l'hydrolyse des minéraux primaires ; mais aussi à l'action de l'homme sur son environnement. L'analyse des ions majeurs nous présente des teneurs qui sont pour la plupart très inférieures aux normes prescrites par l'OMS. A partir de la classification des eaux d'irrigation, on se rend compte que ces eaux ne présentent aucun danger pour l'irrigation car elles sont à alcalinité faible et leur salinité varie d'une valeur moyenne à élevée.

L'analyse des fluctuations spatiales de quelques paramètres physico-chimiques a apporté une contribution importante à l'étude du comportement hydrochimique des eaux souterraines du bassin versant de Bidou. La combinaison des différents résultats obtenus montre que la géologie, la géométrie du socle et les variations d'épaisseurs du manteau d'altération contrôlent en grande partie : la productivité des formations géologiques, les vitesses et les directions

d'écoulement. Ce travail a permis de proposer, à partir de la compréhension du contexte géologique et hydrodynamique, un modèle conceptuel hydrogéologique du système aquifère du bassin versant de Bidou. Cependant, ce travail présente des limites ou des aspects qui n'ont pas pu être abordés ou approfondi dû à certaine lacune dans les données.

Les **perspectives** à la suite de cette étude sont les suivantes :

- de mener plus de campagne d'échantillonnage notamment au cours des deux saisons (sèche et pluvieuse) afin d'avoir un résultat complet de la variation dans l'espace et dans le temps de la qualité de l'eau ;
- de mener une étude bactériologique pour compléter l'étude sur la qualité et l'impact sur la santé des populations ;
- obtenir des informations supplémentaires notamment sur la géophysique pour mieux caractériser les aquifères, et qui couvriront toute la zone d'étude pour pouvoir effectuer aisément une modélisation numérique des aquifères de la zone d'étude,

REFERENCES

- Abderamane, H. (2012).** Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). Thèse. Doctorat PhD. Univ de Poitiers, 319p.
- Ahoussi K.E., 2008.** Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville, mém.de thèse de l'Univ.de Cocody, option hydrologie, hydrogéologie, 270p.
- Appelo C.A.J. et Postma D., 1993.** Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema, Leiden, The Netherlands, 649 p.
- Banton O., Bangoy L., 1997.** HYDROGÉOLOGIE, multi science environnementale des eaux souterraines. Press. Univ. Québec. AUPELF. UREF, 460 p.
- Boutrais J., 1995.** Hautes terres d'élevage au Cameroun. Thèse de doct. De Géographie, Université de Paris X, ORSTOM, Etudes et thèses, Paris, 1302 p.
- Castany G., 1998.** Hydrologie : Principes des méthodes. Ed. Dunod, Paris, 238 p.
- Castany G., 1982.** Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Edition Dunod, Paris, 373p.
- Cho M., K.M. Ha, Y.S. Choi, W.S. Kee, P. Lachassagne et R. Wyns (2003).** Relationships between the permeability of hard rock aquifers and their weathering cover based on geological and hydrogeological observations in South Korea. *Proceedings of the International Conference on "Groundwater in fractured rocks"*, International Association of Hydrogeologists, 15 au 19 septembre, Prague, République tchèque, pp. 41-42.
- Courtois N., P. Lachassagne, R. Wyns, R. Blanchin, F. Bougaire, S. Some et A. Tapsoba (2009).** Large-scale mapping of hard-rock aquifer properties applied to Burkina Faso. *Ground Water*, 48, 269-283.
- Danwe F., 2016.** Etude hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines dans le bassin versant de Mayo Dakadjé. Mémoire de master, Université de Ngaoundéré. 71p.
- Dawaï D., Tchameni R., Bascou J., Wangmene Awe S., Fosso Tchunte P.M., Bouchez. J. L., 2017.** Microstructures and magnetic fabrics of the Ngaoundéré granite pluton (Cameroon : implications of the late – Pan - African evolution Central Cameroon Shear Zone. *Journal of African Earth Sciences* 129 (2017) 887-897.
- Detay. (1993).** Forage d'eau (réalisation, entretien, minéralisation). Eds. Masson. Paris, 280p.
- Dewandel B., P. Lachassagne, R. Wyns, J.C. Marechal et N.S. Krishnamurthy (2006).** A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Hydrology J.*, 330, 260-284.

- Dumont J-F., 1987.** Étude structurale des bordures nord et sud du plateau de l'Adamaoua : influence du contexte atlantique, *Géodynamique* 2 (1) pp 55-48.
- Fantong W. Y., Chounna G., Jokam Nenkam.L.L.T, Fouepe T.A., Chi Fru E., Vassolo S., Montcoudiol N., Yaya Fodoue, Haman D.J. B., Carlier C., Nbandah P., Nkeng G. E., 2023.** Hydrogeochemistry of low agricultural soil yield in Sahelian and sub-tropical watersheds, Northern Cameroon. *ELSEVIER* doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104823.
- Foano D. W. (2020).** Etude des propriétés hydriques du sol pour l'amélioration du rendement agricole dans la commune de Ngaoundéré III (Adamaoua-Cameroun).Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 80p.
- Fouepe Takounjou A., Fantong W., Ndam Ngoupayou J., Sighe N., 2012.** Comparative analysis for estimating hydraulic conductivity values to improve the estimation of groundwater recharge in Yaoundé-Cameroon *British journal of Environment and Climate change*.
- Fouépé T.A., Foano D.w., Fodoué Y., Fantong W., Ngah M., Jokam N. T., Carlier C., Vassolo S., Montcoudiol N., Enow T. C., Chounna G., Kringel R., 2022.** Assessment of water availability for agricultural activities in the savannah Plateau of Adamawa-Cameroon. *Springer Nature* DOI <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10476-z>, 2022.
- Ganwa, A.A, Siebel, W., Frisch, W., Shang, C.K., 2011.** Geochemistry of magmatic rocks and time constraints on deformational phases and shear zone slip in the Meiganga area, central Cameroon. *International Geology Review* 53, 759-784.
- Ganwa, A.A., Frisch, W., Siebel, W., Ekodeck, G.E., Shang, K.C., and Ngako, V., 2008.** Archean inheritances in the pyroxene-amphibole-bearing gneiss of the Meiganga area (Central North Cameroon): Geochemical and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age imprints: *Comptes Rendus Geosciences* 340, 211-222.
- Giao P.H., Weller A., Hien D.H., Adisornsupawat K., 2008.** An approach to construct the weathering profile in a hilly granitic terrain based on electrical imaging. *Elsevier* doi:10.1016/j.jappgeo.2008.
- Humbel F.X., 1966** Etude de certain sols rouge à sable quartzeux de l'Adamaoua (Cameroun).ORSTOM, Yaoundé (CMR), 28 p.
- Kouassy Kaledje P. S., 2010.** Etude piézométrique et caractérisation hydrochimique des eaux souterraines du bassin de la Bibakala (Nord-Ouest de Ngaoundéré). Mémoire de DEA. Université de Yaoundé I, 90p.

- Lachassagne, P.; Dewandel, B.; Wyns, R., 2015.** The Conceptual Model of Hard Rock Aquifers and Its Practical Applications. *Vingtièmes Journ. Tech. Com. Fr. Hydrogéologie Assoc. Int. Hydrogéologues Roche-Sur-Yon* 11 Pp 2015
- Lachassagne P, Wyns R, Dewandel B. 2011.** The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. *Terra Nova* 23 (3): 145–161.
- Laplanche André et Bachelier Georges. (1954).** Un processus pédologique de la formation des cuirasses latéritiques dans l'Adamaoua (Nord-Cameroun). *Revue de Géomorphologie Dynamique*, (5), p.214-219
- Lasserre M., 1961.** Etude géologique de la partie orientale de l'Adamaoua (Cameroun Central) et les principales sources minéralisées de l'Adamaoua, *Bulletin de la Direction des Mines et Géologie du Cameroun* (1961) (4).
- Maréchal J.C., B. Dewandel et K. Subrahmanyam (2004).** Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fissured layer of a hard rock aquifer. *Water Resour. Res.*, 40, DOI : 10.1029/2004WR003137.
- Matini L., Moutou J.M., Kongo-Mantono M.S., 2009.** Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique SCIENCE* 05(1) (2009) 82 – 98p.
- Matsindjou Djoumessi V., 2004.** Etude des caractéristiques physico - chimiques et de la péizométrie des nappes dans le plateau sud camerounais (région d'Abong - Mbang), *Mémoire de DEA, Université de Yaoundé I*, 62 p.
- Mfonka, Z., Ndam Ngoupayou, 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). *Int. J. Biol Chem. Sci*, 9(4) : 2200 – 2218.
- MINEE, 2009.** Plan National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE) : Etat des lieux du secteur, Tomes 1, 2, 3 et 4.
- Moreau C., Regnuolt, J., Deruelle, B., and Robineau, B., 1987.** A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa: *Tectonophysics*, vol. 141, pp 317-334.
- Musy A., 2005.** Cours d'hydrologie générale. Section SIE et GC. 4e semestre Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements ; Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement. (ISTE) ; Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL). 166p.
- Nana, G. A. (2015).** Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Mewoulou (Nord-Yaoundé). *Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I*, 83p.

- Ngouh, A. N., Kpoumie, A., Ghislain Nyembe, E., Ndam Ngoupayou, J. R. (2020).** Caractérisation Hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé–Cameroun). *European Scientific Journal*. pp 281-308.
URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n15p281>
- Ngounouno I., 1998 :** Chronologie, pétrographie et cadre géodynamique du magmatisme cénozoïque de la "Ligne du Cameroun ", Géosciences au Cameroun, Vicat J.-P. et Bilong P. éd., Collection GEOCAM, 1/1998, Presses. Univ. Yaoundé I, pp. 167-184.
- Njine et al. (2001).** Evaluation de la charge polluante et de la charge bactérienne des rejets des stations d'épuration à boues activées à Yaoundé (Cameroun). *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé*, Vol 11, No 2, pp. 79-84.
- Njueya, A.K.; Kengni, L.; Fonteh, M.F.; David Nkouathio, G.; Mebo, S.M.B.** Characterization of Aquifers and Hydrogeochemical Processes in Ngaoundéré, Adamawa Region, Cameroon. *Arab. J. Geosci.* 2022, 15, 1024
- Njueya, A.K.; Zebaze, A.T.; Kengni, L.; Temgoua, E.; Nkouathio, D.G.; Chezie, S.D.** Assessment of Groundwater Mineralization Processes in Mbakaou Area (Adamawa Plateau – Cameroon), by Using Conventional Diagrams and Multivariate Statistical Analysis. *Eur. J. Environ. Earth Sci.* 2021, 2, 44–52
- Njueya A.K, Likeng H.D et Nono A., 2012.** Hydrodynamique et qualité des eaux souterraines dans le bassin sédimentaire de douala (Cameroun) : cas des aquifères sur formations quaternaires et tertiaires *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(4): 1874-1894, ISSN 1991-8631.
- Nkouandou O.F., Ngounouno. I., Déruelle B., 2010.** Géochimie des laves basaltiques récentes des zones Nord et Est de Ngaoundéré (Cameroun, plateau de l'Adamaoua, Afrique centrale) : pétrogenèse et nature de la source. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4: 984-1003
- Nkouandou O.F., Ngounouno I., Déruelle B., Ohnenstetter, D., Montigny, R., Demaiffe, D., 2008.** Petrology of the Mio-Pliocene volcanism to the North and East of Ngaoundéré (Adamawa, Cameroon). *Comptes Rendus Geosciences* 340, 28-37
- Nsangou, D. (2017).** Etude de la vulnérabilité des ressources en eau du bassin versant du Mfu sur le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I*, 85p.
- Olivry J. C., 1986.** Fleuves et rivières du Cameroun, Ed. MESRES-ORSTOM, coll. « Monographies Hydrologiques ORSTOM », N°9, Paris, France, 733 p.
- Olivry J.C., Chouret, A.Vuollaume., G.Lemoelle. J., et Briquet.J.P., 1996.** Hydrologie du lac Tchad. Monographie hydrologique 12. ORSTOM, Paris.

Olivry J.C., Naah E., 1978. Qualité des eaux de quelques rivières du Cameroun Méridional. Rapp. ONAREST, Paris, 733 p.

PDC de la commune de Ngaoundéré IIIème, 2013. Programme National de Développement Participatif, MINEPAT, 249 P.

Podlewski, A., 1971. La dynamique des principales populations du Nord-Cameroun (2^{ème} partie) piémont et plateau de l'Adamaoua. Cah. Orstom. Sér.Sci.Hum., 8, n° spécial, 148 p.

odier

R J., 1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e édition Dunod, Paris.

Saha-Fouotsa A.N., Vanderhaeghe O., Barbey P., Eglinger A., Tchameni R., Zeh A., Fosso Tchunte P., Nomo Negue E., 2019. The geologic record of the Central African Orogenic Belt in the central Cameroon domain (Mbé – Sassa – Mbersi region). Journal of African Earth Sciences 151 (2019). 286 – 314.

Sighomnou D. L., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrographiques au Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de doctorat d'état, Uy1,289p.

Struckmeier, W.F., Margat, J. 1995. Hydrogeological maps - a guide and a standard legend. International Association of Hydrogeology, IAH International Contributions to Hydrogeology, volume 17, Heise, Hannover

Suchel J. B., 1988. Les climats au Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de SaintEtienne, tome 4, + 332 figures et 17 images météosat, 1188 p.

Tamonkem A. R., 2014. Caractérisation hydrogéologique et hydrodynamique du plateau de l'Adamaoua. Mémoire de Master. Université de Ngaoundéré, 75p.

Tamonkem A. R. Kemgang D. T., Mvondo V. Y. E., Iwoudam M. E., Ngounou N. B., 2024. Contribution of Piezometry and Hydro-Geochemistry to a Better Understanding of the Adamawa-Yadé Hard Rock Aquifer System in Ngaoundéré. *American Journal of Water Resources*, 2024. Vol, 12, No, 2, 39-52.

Temdjim R., Njilah I. K., Kamgang P., Nkoumbou C., 2004. Données nouvelles sur les laves felsiques de Ngaoundéré (Adamaoua, ligne du Cameroun) : chronologie K-ar et pétrologie AJST, Vol. 5 NO.2. Le volcanisme de la région de Ngaoundéré (Adamaoua - Cameroun).

Toteu S. F., Van Schmus W. R., Penaye J., Michard A., 2001 : New U-Pb and Sm-Nd data from North-Central Cameroon and its bearing on the pre-pan-African history of Central Africa. *Precambrian Res.* 108, 45-73.

- Tchotsoua M., Ndamé J.P., Wakponou A., Bonvallot J. ,1999.** Maitrise et gestion des eaux à Ngaoundéré (Cameroun) problèmes et esquisses de solutions. *Geo-Eco-Trop.* 23, pp 91-105.
- Tita, M.A. (2008).** Water pollution of the Nkoup river system and its environmental impact on Foumbot town (Western Cameroon). Thèse de Doctorat/PhD, Univ. Ydé I 62p.
- Völger K., Boutrais J., Dulieu D., Fricke W., Mahn C., Meier W., Richtscheid P., Semmel A., 1980.** Land use planning study for Adamaoua, Institut for Applied Geosciences, GTZ, 173 p.
- Yao T. K., Oga M-S., Fouché O., Baka D., Pernelle C., Biemi J., 2012.** Évaluation de la potabilité chimique des eaux souterraines dans un bassin versant tropical : cas du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire . *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6: 7069-7086.

ANNEXES

Annexe 1 : coordonnées géographiques et Niveaux piézométriques (NP) des ouvrages suivis dans le site d'étude

Code	X	Y	NP
P1	13,56534	7,54201	1366,33
P2	13,56182	7,52746	1277,86
P3	13,56428	7,52913	1291,07
P4	13,5653	7,52979	1288,74
P5	13,5655	7,53025	1289,5
P6	13,56604	7,53098	1157,1
P7	13,55298	7,51503	1151,4
P8	13,55715	7,49906	1147,97
P9	13,55623	7,48807	1119,27
P10	13,55261	7,48072	1139,91
P11	13,55715	7,48021	1136,18
P12	13,55286	7,47901	1027,09
P13	13,55288	7,47983	1133,95
P14	13,55069	7,47501	1092,35
P15	13,54936	7,46217	1117,48
P16	13,55251	7,46138	1117,46
P17	13,55309	7,46074	1122,23
P18	13,59151	7,45319	1110,51
P19	13,55394	7,44823	1101,82
P20	13,55396	7,45278	1116,64
P21	13,57926	7,4562	1100
P22	13,57282	7,45296	1170
P23	13,56858	7,45497	1128,06
P24	13,56925	7,45846	1140,69
P25	13,57193	7,46395	1130
P26	13,57678	7,47095	1140,1
P27	13,55977	7,43634	1100
P28	13,5592	7,43634	1102
P29	13,55899	7,43678	1107,05
P30	13,56279	7,43526	1052,25
P31	13,56209	7,43507	1087,4
P32	13,56627	7,43481	1079,93
P33	13,56837	7,43515	1100,76
P34	13,58017	7,43506	1110
P35	13,57635	7,43495	1093,37
P36	13,58479	7,42954	1117,64
P37	13,5554	7,42877	1087,3

P38	13,55777	7,42759	1090,05
P39	13,55493	7,42732	1090,6
P40	13,54062	7,43012	1092,1
P41	13,54235	7,43121	1087,55
P42	13,54016	7,43214	1072,81
P43	13,53982	7,4333	1090,14
P44	13,54245	7,44146	1083,32
P45	13,5388	7,43087	1082,71
P46	13,53817	7,4313	1090,8
P47	13,55553	7,41968	1075,8
P48	13,5541	7,42014	1080
P49	13,55357	7,41928	1082,3
P50	13,55429	7,4174	1094,76
P51	13,55379	7,41874	1085,24
P52	13,55341	7,42018	1074
P53	13,55646	7,42039	1075,5
P54	13,557719	7,427405	1093,2
P55	13,55681	7,42089	1078
P56	13,55309	7,46074	1120
P57	13,56499	7,54273	1380
P58	13,55577	7,43662	1090
P59	13,5663	7,540712	1368
P60	13,55288	7,46499	1122,77
P61	13,5568	7,42057	1090
P62	13,55577	7,43685	1088,5

Annexe 2 : : types de margelle (a : mur de parpaing, b : pneus de camion, c : futs)



Annexe3 : Paramètres physico-chimiques et chimiques

ouvrages	T	PH	EC	HCO3	K	Na	Cl (	Mg (	Ca	Fe	Mn	SO42-	NO3	NH4	F	TZ+	TZ-
Unités	(°C)	/	(μS/cm)	(mg/l)												(még/L)	
P1	24	5,8	27	13,7	0,4	0,6	0,065	0,881	2,60	0,015	0,233	-0,003	-0,003	-0,01	0,021	0,24	0,23
P2	25,5	5,2	16	5,1	0,1	0,3	0,045	0,211	1,07	0,013	0,064	-0,003	0,046	-0,01	-0,003	0,09	0,09
P3	24,7	5,2	11	3,8	0,2	0,3	0,070	0,165	0,75	0,012	0,020	0,005	0,118	-0,01	0,005	0,07	0,07
P4	24,7	6,5	68	39,6	0,4	0,5	0,124	0,508	12,0	0,029	0,025	0,383	0,229	0,01	0,031	0,67	0,68
P5	26,2	5,2	14	5,7	0,2	0,3	0,046	0,351	0,92	0,014	0,074	-0,003	-0,003	0,01	0,008	0,09	0,10
P6	24,7	5,2	11	3,4	0,2	0,3	0,077	0,102	0,53	0,149	0,012	0,035	0,043	0,01	0,003	0,05	0,06
P7	25,1	5,3	12	4,6	0,2	0,4	0,059	0,161	0,81	0,037	0,020	0,011	-0,003	-0,01	0,003	0,08	0,08
P8	25	5,8	168	10,8	1,4	17,0	16,4	2,10	6,86	0,216	0,653	0,150	44,4	0,01	0,013	1,29	1,36
P9	20,4	7,6	135	80,7	1,5	3,5	0,404	5,33	15,7	0,110	0,106	0,230	1,71	-0,01	0,121	1,42	1,39
P10	23,3	5,2	24	3,1	0,3	1,8	0,625	0,332	0,95	0,023	0,271	0,017	5,70	0,04	0,007	0,16	0,16
R1	20,7	7,0	22	12,0	0,4	0,9	0,086	0,766	1,87	0,199	0,034	0,046	0,088	0,01	0,035	0,21	0,20
R2	21,3	6,9	23	13,0	0,6	1,3	0,148	0,755	1,80	0,238	0,052	0,048	0,063	-0,01	0,035	0,22	0,22
R3	20,4	6,4	19	11,4	0,2	0,6	0,017	0,752	1,87	0,317	0,032	0,004	0,108	-0,01	0,035	0,19	0,19
R4	22,4	6,7	21	10,7	0,3	0,7	0,065	0,659	1,64	0,425	0,063	0,007	0,068	0,01	0,032	0,18	0,18
R5	19,5	5,4	13	7,0	0,1	0,5	0,019	0,296	0,76	1,036	0,027	0,007	-0,003	-0,01	0,009	0,09	0,12
E1	24,1	6,2	14	7,1	0,3	0,5	0,022	0,381	1,20	0,093	0,037	-0,003	0,106	-0,01	0,022	0,12	0,12
E2	23,4	6,7	35	20,7	0,6	1,6	0,047	1,33	3,07	0,094	0,045	0,005	0,076	-0,01	0,061	0,35	0,35
R6	21	6,2	31	18,3	0,7	1,3	0,028	1,17	2,56	0,301	0,193	-0,003	-0,003	-0,01	0,050	0,30	0,31
R7	22,8	6,7	23	12,6	0,6	1,1	0,041	0,799	1,85	0,158	0,093	0,015	0,024	-0,01	0,040	0,22	0,21
R8	20,7	6,4	11	5,8	0,3	0,7	0,035	0,235	0,92	0,249	0,014	0,017	-0,003	-0,01	0,018	0,10	0,10
R9	22	6,8	20	10,6	0,3	0,9	0,049	0,722	1,81	0,327	0,040	0,022	0,044	-0,01	0,036	0,20	0,18
R10	22,8	7,5	117	71,8	1,5	3,2	0,096	5,51	11,4	0,665	0,157	-0,003	1,19	-0,01	0,141	1,21	1,22
F1	24,3	7,2	118	72,4	1,4	4,7	0,032	4,09	12,9	0,026	0,003	0,013	-0,003	-0,01	0,098	1,23	1,21
F2	22,5	6,6	27	116	5,0	10,8	0,139	6,11	16,6	0,016	0,001	0,031	-0,003	-0,01	0,110	1,94	1,94
F3	25,5	5,8	55	38,2	0,7	1,9	0,018	2,88	6,11	-0,003	-0,001	0,005	-0,003	0,01	0,103	0,65	0,64
F4	26	7,2	186	101	2,5	13,0	0,179	5,03	14,7	0,143	0,071	0,927	0,007	-0,01	2,13	1,78	1,71
F5	25,9	7,4	329	212	4,3	43,9	0,449	6,43	18,8	-0,003	0,100	0,031	-0,003	-0,01	0,558	3,49	3,55

pH : Potentiel d'hydrogène **T** : Température ; **TZ+** : Somme des équivalents cations ; **TZ-** : Somme des équivalent anions

Annexe 4 : Classification des eaux selon le pH Rodier, (2009).

pH	Correspondance
pH<5	Acide forte
pH=7	Neutralité (eau pure)
7<pH<8	Neutralité (eau de surface)
pH>8	Alcalinité, évaporation intense
5,5<pH<8	Neutralité a basique (majorité des eaux souterraine)

Annexe 5 : Relation entre la conductivité et la minéralisation Detay, (1993).

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

Annexe 6 : Classification d'ORSTOM

Valeur de l'indice de pente globale	Type de relief
$I_g < 0,002$	Très faible
$0,002 < I_g < 0,005$	Faible
$0,005 < I_g < 0,01$	Assez faible
$0,01 < I_g < 0,02$	Modéré
$0,02 < I_g < 0,05$	Assez fort
$0,05 < I_g < 0,1$	Fort
$I_g < 0,1$	Très fort

Annexe 7 : Exemple d'une Fiche de suivi de l'essai d'infiltration par la méthode de Porchet (PROSEP)

		PROSEP Etude Hydrogéologique Essai de perméabilité en zone non saturée : Essai de Porchet		
Région : Adamawa		Bassin versant de : MBIDOU		
Date	07-03-20	Rayon du trou (cm) :	8.5	
Expérimentateur	Dr Fouspe	Profondeur du trou (cm) :	35	
Coordonnées	X : E013.591 64°	Heure	Debut : 10h38	
	Y : N07.453 23°		Fin : 13H27	
	Z : 1072m			
N°	Temps (sec) 13H21	Intervalle de temps entre les mesures (Sec)	Profondeur du plan d'eau (cm)	Observations
1	0	0	3.2	la texture du sol est sableuse
2	5	5	4.5	
3	10	5	5.9	
4	15	5	7.5	
5	20	5	8.5	
6	25	5	9.4	
7	30	5	10.4	
8	35	5	11.5	
9	40	5	12	
10	45	5	13	
11	50	5	14	
12	55	5	15	
13	60	5	15.5	
14	65	5	16	
15	70	5	17	
16	75	5	17.5	
17	80	5	18	
18	85	5	18.5	
19	90	5	19	
20	95	5	19.4	
21	100	5	20	
22	105	5	20.4	
23	110	5	20.6	
24	115	5	21	
25	120	10	21.5	
26	130	10	21.8	
27	140	10	22	
28	150	10	22.4	
29	160	10	22.6	
30	170	10	22.7	
31	180	10	23.1	
32	190	10	23.8	
33	200	10	24.2	
34	210	10	25.1	
35	220	10	25.9	
36	230	10	26.4	
37	240	10	26.9	
38	250	10	27.5	
39	260	10	28.1	
40	270	10	28.6	
41	280	10	29	
42	290	10	29.4	
43	300	10	30	

Annexe 8 : Quelques valeurs de pompage d'essai effectué dans les localités de Gadabidou, Malang et de Maiborno

Gadabidou			Malang			Maiborno		
t [s]	water table	s [m]	t [s]	water table	s [m]	t [s]	water table	s [m]
0	1074.84	0.000	0	1081.3095	0.000	1080	1107.4923	1.558
30.0000001	1074.204	0.636	30.0000001	1080.7077	0.602	1110	1107.4789	1.571
60.0000002	1071.449	3.391	60.0000002	1079.1322	2.177	1140	1107.4732	1.577
90.0000003	1069.613	5.227	89.9999997	1078.4786	2.831	1170	1107.4732	1.577
120	1068.040	6.800	120	1078.0627	3.247	1200	1107.4521	1.598
150	1066.761	8.079	150	1077.8193	3.490	1230	1107.4521	1.598
180	1065.767	9.074	180	1077.6583	3.651	1260	1107.4329	1.617
210	1064.960	9.881	210	1077.5413	3.768	1290	1107.4387	1.611
240	1064.421	10.419	240	1077.4628	3.847	1320	1107.4387	1.611
270	1063.978	10.862	270	1077.4168	3.893	1350	1107.4253	1.625
300	1063.721	11.119	300	1077.3631	3.946	1380	1107.4118	1.638
330	1063.399	11.441	330	1077.3286	3.981	1410	1107.4061	1.644
360	1063.164	11.676	360	1077.3018	4.008	1440	1107.385	1.665
390	1063.156	11.684	390	1077.2749	4.035	1470	1107.385	1.665
420	1062.882	11.958	420	1077.25	4.060	1500	1107.3793	1.671
450	1062.397	12.443	450	1077.2366	4.073	1530	1107.3716	1.678
480	1061.818	13.022	480	1077.2155	4.094	1560	1107.3658	1.684
510	1061.061	13.779	510	1077.1887	4.121	1590	1107.3448	1.705
540.000001	1059.976	14.864	540	1077.1753	4.134	1620	1107.339	1.711
570	1058.834	16.006	570	1077.1561	4.153	1650	1107.3582	1.692
600	1057.776	17.064	600	1077.1293	4.180	1680	1107.3448	1.705
630	1056.574	18.266	630	1077.1082	4.201	1710	1107.3313	1.719
660	1055.372	19.468	660	1077.0948	4.215	1740	1107.3256	1.724
						1770	1107.3122	1.738

Annexe 8 : Quelques images du terrain

