UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI
=======
INSTITUT NATIONAL DE L'EAU
=======

DEPARTEMENT D'HYDROLOGIE ET GESTION DES RESSOURCES EN EAU

Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de

LICENCE Professionnelle en Hydrologie

OPTION : Géohydrologie

==========

ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DE LA COMMUNE DE BOPA

==========

Réalisé par : **NOUAGOVI Celia Merinda Mahugnon**

Mention : **Très bien**

Membres du jury	Emargement
Prof ALASSANE Abdou Karim (Président)	
Dr. SAMBIENOU Wèré Gédéon (Examinateur)	
Ing. AZONSI Félix (Rapporteur)	

PROMOTION : 2023 - 2024

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, comme preuve de respect et de gratitude, pour le soutien moral, financier, l'amour infini ainsi que tous les efforts consentis pour ma formation. J'espère qu'à travers ce mémoire, ils découvriront un hommage sincère à leurs efforts et à leurs sacrifices, gravés avec reconnaissance et admiration.

REMERCIEMENTS

Je commence ces remerciements en rendant grâce au Seigneur, pour m'avoir guidée, fortifiée et inspirée tout au long de ce parcours. Car sans sa miséricorde et sa lumière, rien de tout cela n'aurait été possible.

J'adresse aussi de sincères remerciements aux personnes suivantes :

- Au Professeur Félix AZONSI ; mon maitre mémoire, pour sa patience, son accompagnement et ses conseils avisés qui non seulement ont façonnés mon travail, mais également ma réflexion et ma détermination
- A l'équipe du bureau d'étude HYDRO-Génie, en particulier à messieurs N'DANIKOU Maxime, EDOUN Matthieu et SALAMI Serge ; qui ont su me transmettre leur savoir et leur passion tout en me permettant de m'enrichir tant sur le plan personnel que sur le plan professionnel
- Au Professeur Daouda MAMA, Directeur de l'Institut National de l'Eau (INE), pour nous avoir permis l'insertion dans son établissement ;
- A mes ainés, qui ont pavés le chemin avant moi et qui ont partagés leurs précieux conseils
- A tous les responsables de la formation professionnelle en hydrologie à l'Institut National de l'Eau (INE)
- A mes camarades, qui ont vécu cette expérience avec moi, en apportant leur amitié précieuse, leur entraide et leur présence réconfortante
- A mon oncle Marcel NOUAGOVI et à ma sœur Valérie NOUAGOVI, pour avoir cru en moi et m'avoir soutenu de manière indéfectible
- A mes frères et sœurs, cousins et cousines ; qui ont toujours été là m'offrant leur soutien, leur amour et leur réconfort
- A tous les membres du jury, pour l'honneur que vous me faites en consacrant votre temps à l'évaluation de mon travail

Ce mémoire est le fruit d'un chemin parsemé d'efforts de doutes mais surtout de beaucoup de soutien et d'amour. A tout un chacun de vous, je dis merci, du plus profond de mon cœur

RESUME

La commune de Bopa, située dans le département du Mono, est réputée pour son hydrographie, son hydrogéologie et le lien étroit que son développement et sa population entretien avec ses eaux. Cette étude se concentre en particulier sur la caractéristique de cette commune qui est à la base de la modification de la température de ces eaux mais aussi sur celle qui induit le caractère artésien de ces nappes à partir des données géologiques, topographiques et lithologiques à notre disposition. Il ressort des coupes hydrogéologiques réalisées que les forages traversent généralement trois formations à savoir l'argile, le calcaire et le sable. Ces formations s'organisent stratigraphiquement de manière à ce que les aquifères qui sont soit le sable ou le calcaire soient captifs et soumis à une telle pression qu'aidé de la topographie, leurs nappes soient artésiennes et donc que la plupart des eaux jaillissent lorsqu'ils sont captés ou remontent naturellement dans les forages. Ensuite, en ce qui concerne la température des eaux, les formations imperméables exercent une pression assez importante sur les aquifères. De sorte que la pression combinée au gradient géothermique, augmente la température des eaux qui deviennent tièdes. Les fractures profondes quant à elles, combinées au gradient géothermique et à la pression sont responsables de l'apparition des eaux chaudes dans la commune.

Mots clés : nappes artésiens, eaux chaudes, eaux tièdes, hydrogéologie, gradient géothermique

ABSTRACT

The commune of Bopa is part of the Mono department and is bordered to the north by the communes of Dogbo and Lalo, to the south by the communes of Comè and Houéyogbé, to the east by the Couffo River and Lake Ahémé, which it shares with the communes of Allada and Kpomassè, and to the west by the communes of Lokossa and Houéyogbé. It is well-known for its water systems, hydrogeology, and the close relationship between its development, its population, and its waters. This study focuses particularly on the characteristics of the commune that influence temperature changes in its waters, as well as on the factors responsible for the artesian nature of its water tables, based on the geological, topographical, and lithological data available to us. Hydrogeological sections show that boreholes typically pass through three layers: clay, limestone, and sand. These layers are arranged in such a way that the aquifers whether made of sand or limestone are confined and under such pressure that, aided by the topography, the water tables become artesian, causing the water to rise naturally in wells or even gush out when tapped. In terms of water temperature, the impermeable layers exert pressure on the aquifers, and with the help of the geothermal gradient, this pressure causes the water to heat up, making it warm. Deep fractures, combined with the geothermal gradient and pressure, are responsible for the presence of hot water in the commune.

Keywords: artesian aquifers, hot water, warm water, hydrogeology, geothermal gradient.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

DGEau : Direction Générale de l'Eau

INE : Institut National de l'Eau

IGN-BENIN : Institut Géographique National du Bénin

ONU : Organisation des Nations Unies

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

USGS : United States Geological Survey

BDI : Base de Données Intégrée

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte administrative de la commune de Bopa 9

Figure 2 : Carte pédologique de la commune de Bopa 10

Figure 3 : Carte hydrographique de la commune de Bopa 13

Figure 4 : Carte Hydrogéologique de la commune de Bopa 14

Figure 5 : Carte géologique de la commune de Bopa 16

Figure 6 : Carte géomorphologique de Bopa 17

Figure 7 : Carte topographique de Bopa représentant les forages 23

Figure 8 : Traits de coupe 24

Figure 9 : Coupe 1 25

Figure 10 : Coupe 2 26

Figure 11 : Coupe 3 27

Figure 12 : Carte topographique mettant les forages artésiens en évidence 28

Figure 13 : Carte hydrogéologique mettant les forages artésiens en évidence 29

Figure 14 : Carte altimétrique mettant les forages artésiens en évidence 30

Figure 15 : Carte géologique mettant les forages artésiens en évidence 31

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre 1 : clarification conceptuelle 4

1.1. Clarification conceptuelle 5

1.2. Généralités sur les eaux 6

Chapitre 2 : CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES 8

2.1. Présentation de la zone d'étude 9

2.2. Matériels et méthodes 19

Chapitre 3 : Résultats et discussion 22

3. Résultats 23

4. Discussion 32

Conclusion 36

Références 37

Bibliographie 37

Webographie 39

INTRODUCTION GENERALE

La quintessence même de toute forme de vie sur Terre est l'eau. Bien qu'elle soit limitée et vulnérable, cette ressource naturelle est une pierre angulaire du développement durable et de la protection de l'environnement de tout écosystème. Contrairement à l'imaginaire collectif, l'eau ne se retrouve pas qu'à la surface de la terre mais il existe une déclinaison d'elle invisible mais omniprésente sous nos pieds qui constitue près de 99 % de toutes les réserves en eau douce liquide de la planète(UNESCO, 2022). Ces eaux, du fait de leur position et de leur proximité avec les roches, nous pouvons avoir divers types d'eaux souterraines qu'on peut classer en fonction de leur caractéristiques chimiques, hydrodynamiques et physico-chimiques. Relativement à cette dernière caractéristique, bien que certains de ces aspects tels que la conductivité électrique, la dureté de l'eau ou le PH soient facilement maîtrisables, d'autres aspects tels que la température sont encore entouré du spectre du mystérieux. En effet, lorsqu'on aborde l'aspect température des eaux souterraines, on est généralement confrontés au phénomène de l'hydrothermalisme. « L'hydrothermalisme se rapporte à la circulation souterraine d'une eau chaude, chargée en minéraux dissous. Cette circulation, favorisée par une source de chaleur, se déroule souvent dans des filons en zone volcanique, non loin d'une chambre magmatique, ou en zone plutonique »(https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Hydrothermalisme#). Ainsi, il est assez fréquent de rencontrer des sources chaudes dans les pays tels que le Japon, l'Islande, l'Italie ou même la Turquie où cette caractéristique est utilisée à des fins curatifs, économiques, énergétiques et touristiques(https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Source_chaude). Néanmoins on rencontre aussi de l'eau chaude dans le sous-sol de certains pays où il n'y a aucune source de chaleur dont le Bénin. Bien évidemment, on n'y rencontre pas de sources thermales mais on observe une émergence d'eau thermale dans certaines communes tel que la commune de Bopa. Cependant, cette commune ne possède pas que de l'eau chaude dans son sous-sol mais aussi de l'eau froide et de l'eau tiède. C'est fort de ce constat que notre intérêt pour cette spécificité s'est éveillée.

Certaines études ont été menées pour expliquer ce phénomène bien particulier dont Hydrogéologie du Bénin par le docteur BOUKARI en 2007, dans lequel il déclare que le caractère thermal de ces eaux est dû au gradient géothermique. C'est sur cette affirmation que nous sommes restés jusqu'en 2022 où M. Prudence DOSSOU avec son article sur les Facteurs

de contrôle de l'hydrothermalisme sélectif des aquifères jaillissants du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin, Afrique de l'Ouest ; nous a montré que le caractère thermal n'était pas seulement dû au gradient géothermique mais aussi à cause de la présence des fracturations profondes. Il nous semble donc logique de comprendre en quoi la géologie et l'hydrogéologie de cette commune induisent sa versatilité hydrogéologique afin de valoriser, de protéger, de mettre en place une gestion durable des ressources en eau et garantir la sécurité hydrique des populations locales conformément aux recommandations de l'Agenda 2030 pour le développement durable. (ONU, 2015)

Par conséquent, c'est pour contribuer à une meilleure connaissance de cette spécificité thermale et pour connaitre les effets de la géologie sur les eaux du sous-sol que le thème « Etude géologique et hydrogéologique de la commune de Bopa » a été choisi.

Au regard de ce qui précède, la principale préoccupation est de savoir en quoi la géologie de la commune de Bopa affecte la température de ses eaux souterraines ainsi que la nature de ses nappes. Dans le but de répondre à notre préoccupation principale et de structurer notre travail de façon à ce qu'il soit facile à manipuler, nous avons découpé notre problématique en plusieurs problèmes spécifiques que sont :

Q1 : Comment se présente la géologie de la commune de Bopa ?

Q2 : Quelles sont les retombées de la géologie sur les nappes de la commune de Bopa ?

Q3 : En dehors du gradient géothermique et de la présence des fracturations profondes, quelle est la source de l'élévation de la température des eaux dans la commune de Bopa ?

Au cœur de cette recherche se trouvent les objectifs suivants, qui visent à répondre aux questions posées :

Objectif général

Le but ultime de cette recherche est de montrer en quoi la géologie et l'hydrogéologie de la commune de Bopa induisent la versatilité thermique de ses eaux et de faire ressortir la source du caractère captif de la plupart de ces nappes.

Objectifs spécifiques

Plus précisément, nous cherchons à :

- Présenter la géologie de la commune de Bopa

- Identifier les impacts de la géologie sur les eaux souterraines de la commune de Bopa
- Identifier la cause de l'augmentation de la température des eaux souterraines dans la commune de Bopa
- Formuler des suggestions voire recommandations pour une exploitation économique et durable de ces ressources

Hypothèses

Pour atteindre ces objectifs, nous émettons les hypothèses suivantes :

- La commune de Bopa présente un contexte géologique singulier
- La géologie du milieu induit le caractère captif de la plupart des nappes de la commune de Bopa.
- En dehors du gradient géothermique et de la présence des fracturations profonde, un autre phénomène est à l'origine de l'élévation de la température des eaux dans le sol

Pour rendre compte des résultats des travaux de recherche, ce document est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est intitulé revue de littérature ; le second chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, matériels et méthodes d'étude et le troisième chapitre présente les résultats et discussion. Une conclusion suivie des recommandations pour des stratégies d'adaptation et de gestion durable des ressources en eau dans la région, conformément aux principes de la gestion intégrée des ressources en eau seront formulées.

Chapitre 1 : Clarification conceptuelle

1.1. Clarification conceptuelle

Pour une bonne compréhension des concepts utilisés dans le cadre de notre étude, il est nécessaire de définir le contenu de quelques-uns de ces concepts.

1.1.1. Artésianisme :

Aptitude d'un aquifère captif à permettre le jaillissement spontané des puits qui l'atteignent ou l'existence de sources artésiennes, créée par la conjonction de conditions hydrodynamiques et topographiques favorables : niveaux piézométriques initiaux situés au-dessus du sol

1.1.2. Gradient géothermique :

C'est le taux d'augmentation de la température dans le sous-sol à mesure que l'on s'éloigne de la surface. Il s'exprime en K/m ou plus usuellement en K/Km. Le gradient géothermique en Europe est en moyenne d'environ 30K/Km près de la surface, soit une augmentation de 3°C c tous les 100m.

1.1.3. Aquifère :

Un aquifère (acque = eau ; fera = je porte) est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques. (Gilbert Castany, 1998)

1.1.4. Nappe captive :

Encore appelé aquifère confiné, une nappe captive est une formation saturée limitée par deux couches imperméables qui restreignent les mouvements de l'eau. Quand on pompe dans un tel aquifère, le niveau de l'eau change rapidement, puis est restauré quand le pompage cesse.(ALASSANE Abdoukarim et Al. ,2021)

1.1.5. Forage :

C'est un trou circulaire de petit diamètre creusé à partir de la surface du sol jusqu'à une couche aquifère et muni d'un système mécanique ou électromécanique d'exhaure. En fonction de la géologie (terrains sédimentaires plus ou moins cohérents, zones de socle dur, ...), ou de la profondeur à atteindre, plusieurs méthodes de forage peuvent être envisagées(Félix V. AZONSI, 2024). Au nombre de celles-ci, nous avons :

• Le Rotary

• Le battage

• Le MFT(Marteau Fond de Trou)

1.1.6. Source chaude :

Une source chaude est une source dont l'eau qui sort du sol est chauffée par un processus géothermique. Il y a des sources chaudes sur tous les continents, ainsi qu'au fond des mers. C'est une source naturelle dont la température est supérieure à celle du corps humain (normalement entre 36,5 °C et 37,5 °C)

1.1.7. Craton :

Un craton (du grec κράτος, kratos : force), appelé aussi aire continentale, est une vaste portion stable du domaine continental par opposition aux zones instables déformées (les orogènes). Il forme un élément de lithosphère continentale possédant une identité géologique, notamment en termes de nature des roches et de structuration des unités géologiques qui le composent.

1.1.8. Eau Froide :

C'est une eau qui n'est pas exposée pendant une période de temps prolongée à une température supérieure à 30°C

1.1.9. Eau tiède :

C'est une eau qui est légèrement chaude. C'est une eau qui n'est ni chaude ni froide. C'est également une eau qui a une température comprise entre 30°C et 37 °C

1.1.10. Eau chaude :

L'eau chaude est de l'eau dont la température est supérieure à celle de l'eau à température ambiante ou froide, souvent utilisée pour le nettoyage, la cuisson ou encore pour se réchauffer. Selon l'OMS, l'eau est considérée comme chaude lorsqu'elle est située entre 50°C et 60°C, bien que la perception de la chaleur puisse varier en fonction des individus et des contextes (OMS,2011)

1.2. Généralités sur les eaux

1.2.1. Eau pluviale

L'eau de pluie est un liquide sous forme de gouttelettes condensées à partir de l'atmosphère, puis sous forme de vapeur, puis d'un précipité lorsqu'elle est enfin devenue assez lourde pour tomber sous l'effet de la gravité. Dans le principe de sa formation, la composition chimique de l'eau de pluie est variable : elle dépend de la qualité de l'air atmosphérique traversé, dans les milieux urbains l'eau de pluie est considérée comme non potable à l'usage humain à cause des rejets atmosphérique (www.aquaportail.com).

1.2.2. L'eau de mer ou d'océan

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. On dit qu'elle est salée parce qu'elle contient des substances dissoutes, les sels, constitués d'ions, principalement des ions halogénures comme l'ion chlorure et des ions alcalins comme l'ion sodium. On trouve 30 à 40g de sels dissous pour 1 kg d'eau de mer. L'eau salée s'oppose à l'eau douce, qui contient moins de 1g de sels dissous par kilogramme (www.aquaportail.com)

1.2.3. L'eau de surface

Les eaux de surface sont des eaux qui circulent ou qui sont stockées à la surface des continents. Elles proviennent soit par des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit par les eaux de ruissellement (fleuves, rivières, barrages, mares, marigots). Elles sont caractérisées par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable (www.aquaportail.com).

1.2.4. L'eau souterraine

On entend par « eau souterraine » l'eau qui se trouve sous le niveau du sol et qui remplit soit les fractures du socle rocheux, soit les pores présents dans les milieux granulaires tels les sables et les graviers. Contrairement à l'eau de surface, l'eau souterraine n'est pas canalisée comme un ruisseau ou une rivière, mais elle circule en profondeur dans les formations géologiques qui constituent l'espace souterrain. Elle provient des précipitations qui s'infiltrent dans le sol. (MYRAND, 2008)

Chapitre 2 : CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

2.1.1. Contexte géographique et administratif

La commune de Bopa, se présentant comme un quadrilatère allongé, est située entre 1°49' et 2°01' de longitude Est et entre 6°30' et 6°47' de latitude Nord au Sud-Est du département du MONO dont elle est la plus grande commune grâce à sa superficie de 365km^2. Elle occupe de ce fait 22,74% de la superficie dudit département. Bordée au Nord par les Communes de Dogbo et de Lalo, au Sud par les Communes de Comè et de Houéyogbé, à l'Est par le fleuve Couffo et le lac Ahémé qu'elle partage avec les Communes d'Allada et de Kpomassè et à l'Ouest par les Communes de Lokossa et de Houéyogbé ; elle occupe 0,32% de la superficie totale du Bénin. Elle compte soixante (60) localités réparties sur sept (7) Arrondissements à savoir : Agbodji (7 villages) – Badazouin (9 villages) – Bopa (13 quartiers de villes) – Gbakpodji (6 villages) – Lobogo (11 villages) – Possotomè (7 villages) et Yègodoé (7 villages). Le chef- lieu de la Commune est Bopa.

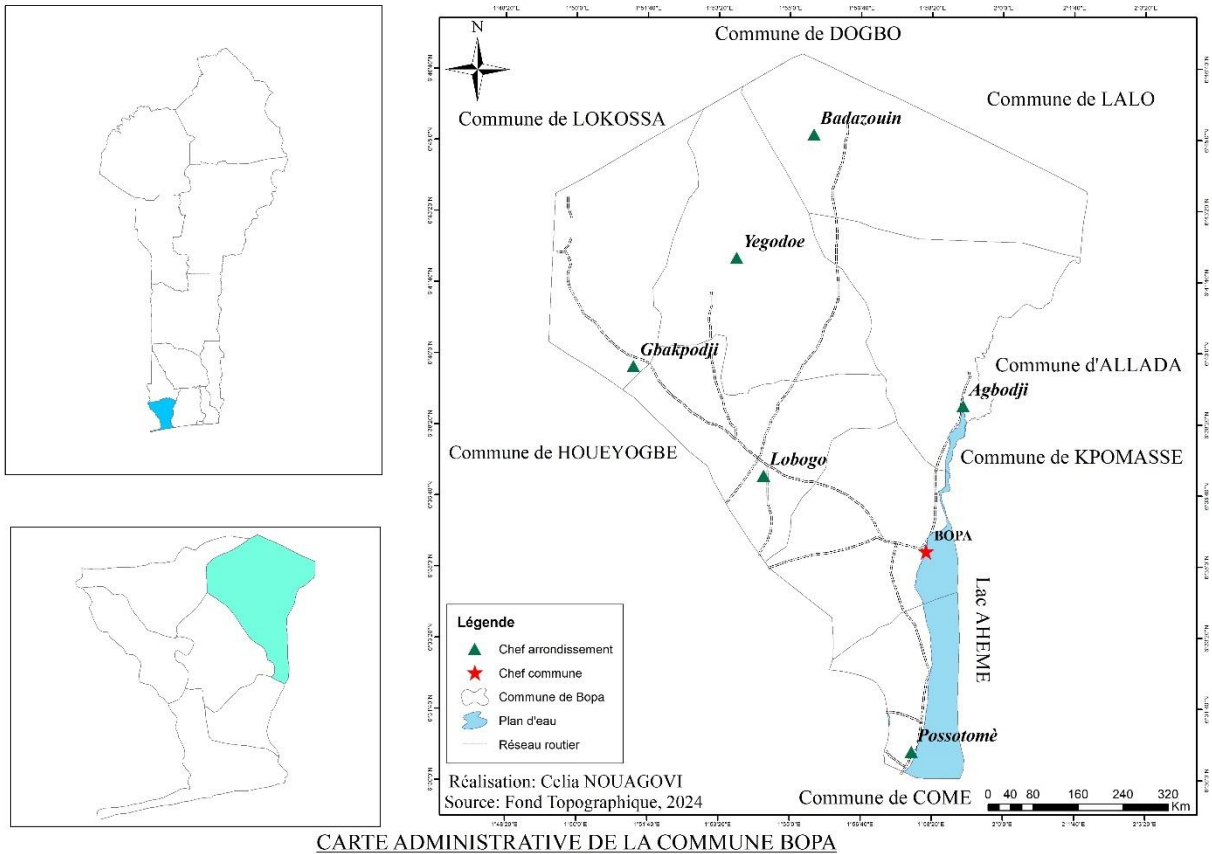


Figure 1 : Carte administrative de la commune de Bopa

2.1.2. Climat

La commune de Bopa est caractérisée par un climat subéquatorial de type Béninien à quatre (04) saisons :

- Une grande saison sèche (de novembre à mars),
- Une grande saison pluvieuse (de mars à juillet),
- Une petite saison sèche (de juillet à août),
- Une petite saison pluvieuse (août à novembre).

Le rythme pluviométrique est alors de type bimodal. On remarque ainsi que la durée de la saison des pluies est d'environ 6 à 7 mois pour la commune avec un cumul pluviométrique annuel moyen se situant généralement entre 800 mm et 1000 mm Ce climat est favorable à la polyculture.

La température moyenne ambiante est d'environ 25°C. On note une faible variabilité de la température sur toute l'année. La température minimale est de 23°C et couvre le mois d'août. La basse température de ce mois règle dans une large mesure, le repos végétatif et la rapidité de la croissance de certaines espèces. Quant à la température maximale, elle est de 26°C et couvre le mois de février, de mars et d'avril. C'est le mois le plus chaud de l'année et peut avoir des impacts significatifs sur la croissance de certaines espèces.

2.1.3. Pédologie

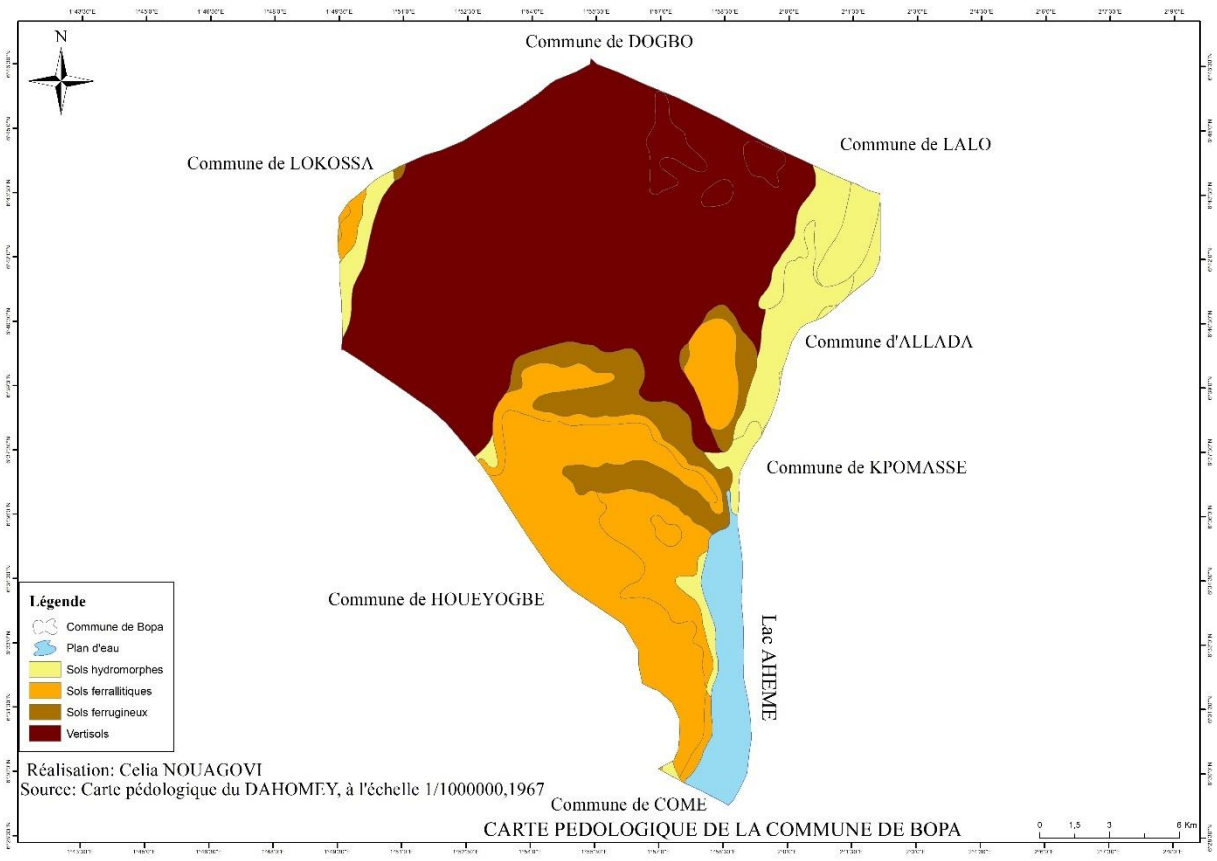


Figure 2 : Carte pédologique de la commune de Bopa

La Commune de BOPA est constituée d'une diversité de sols qu'on regroupe en trois (03) ensembles :

- **les vertisols hydromorphes** ou terres noires encore appelés « KODJI » : Ce sont des sols argileux présentant une mauvaise structure physique. Ces terres noires recouvrent plus de la moitié de la superficie totale de la commune soit 20 106 ha (55%). Elles couvrent les arrondissements de Agbodji, Badazouin, Gbakpodji, Yègodoé et une partie de Lobogo ;

- **les sols ferrallitiques** ou terres de barre sur sédiment meuble : Ce type de sol couvre plus de 20 % de superficie totale de la commune soit 8267 ha. Il est localisé dans les arrondissements de Bopa, Possotomè et la partie sud de Lobogo ;

- **les sols hydromorphes** : Ce type de sol est constitué de bas-fonds (vallées et bassins) et couvre une partie des Arrondissements de Agbodji, Bopa et Possotomè. Ce sont des terres à texture sablo-argileuse couvrant plus de 10 % de la superficie totale de la commune. Ces terres existent sous trois natures différentes à savoir : moyennement organiques, humide à Gley, minéraux ou peu humifères à Gley de profondeur et minéraux ou peu humifères à pseudo-Gley.

2.1.4. Végétation

Le couvert végétal est largement dominé par des mosaïques de cultures et jachères qui peuvent être sous palmiers à huile sur environ 22.418 ha soit 61,42% du territoire de la commune de Bopa. Les plantations forestières et fruitières occupent également une place importante dans l'occupation du sol de la commune avec environ 9.688 ha, comprenant de nombreuses petites plantations privées d'Acacia auriculiformis, d'Eucalyptus camaldulensis, de Terminalia sp, de Tectona grandis (teck), de Khaya senegalensis (caïlcédrat), de Mangifera indica (manguier).

Quelques rares traces de forêts naturelles humides ou semi-humides y subsistent sous forme de reliques de forêts sacrées, dont celles de Zoungbo-mission et de Agbodji centre, deux à Gbedècomè dans Lobogo et celle de Sèhomi dans Possotomè. Les espèces qu'on y rencontre sont : Adansonia digitata (baobab), Ceiba pentandra (fromager ou kapokier), Milicia excelsa (iroko), Triplochyton scleroxylon (samba), Antiaris toxicaria.

On note la présence de marécages le long des rives du lac Ahémé où la végétation aquatique y est constituée de Rhizophora racemosa (Palétuvier rouge), à Avicennia africana (Palétuvier blanc) et à Acrosticum aureum (fougère des mangroves). En plus des prairies marécageuses et des mangroves, la basse végétation est constituée essentiellement de graminées (Panicum maximum), Cyperus sp, le chiendent (Impérata cylindrica).

2.1.5. Hydrographie

La commune se trouve sur deux bassins versants.

Une bonne partie de la commune draine à l'Est vers le Couffo et le lac Ahémé et l'autre portion à l'Ouest vers le Mono. La Commune de Bopa est caractérisée par un complexe fluvio-lacustre dominé par le lac Ahémé de par son étendue. Ce complexe fluvio-lacustre reçoit les eaux du fleuve Couffo dans la partie Nord de la Commune. A ce complexe fluvio-lacustre, s'ajoute d'autres cours d'eau d'une importance non négligeable qui drainent les espaces culturaux. Il s'agit de :

- ''Hasso'' à Tanvè dans l'Arrondissement de Lobogo et ;
- Kpatoè à Mèdétogbo dans l'Arrondissement d'Agbodji.

Il existe également de nombreux plans d'eaux saisonniers (Sodou, Houantoè, Diko, Hlouinvi etc.). Par ailleurs, on y trouve les bas-fonds humides ou collecteurs naturels d'eau de Sèhougbato, Houègbo, Hassonou, Agboh, Agbodji, Bolimè, Kpindji (Bopa) et Tohonou. En effet, certaines zones telles que l'arrondissement d'Agbodji et une partie de Badazouin sont situées en pleine région marécageuse.

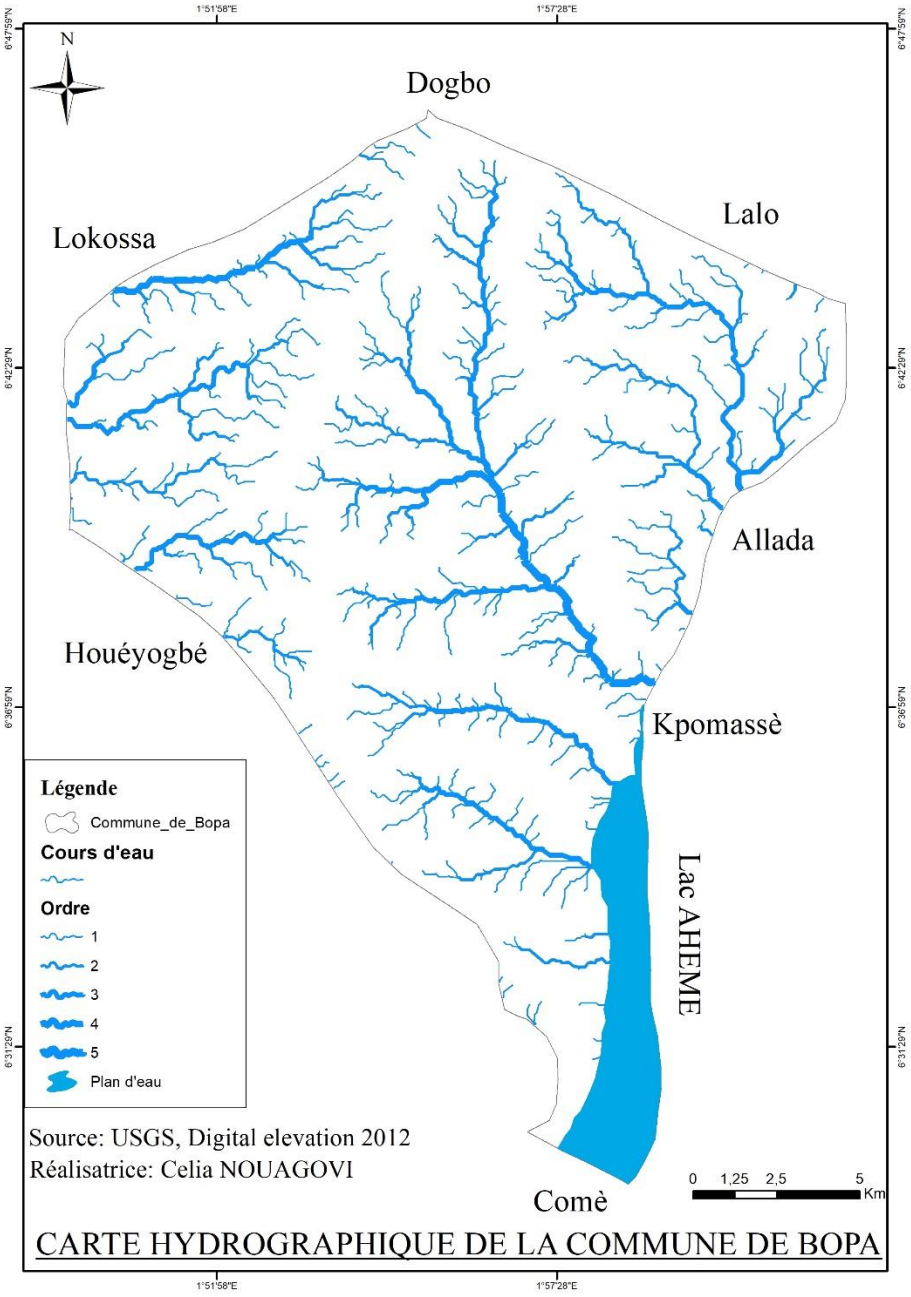


Figure 3 : Carte hydrographique de la commune de Bopa

2.1.6. Hydrogéologie

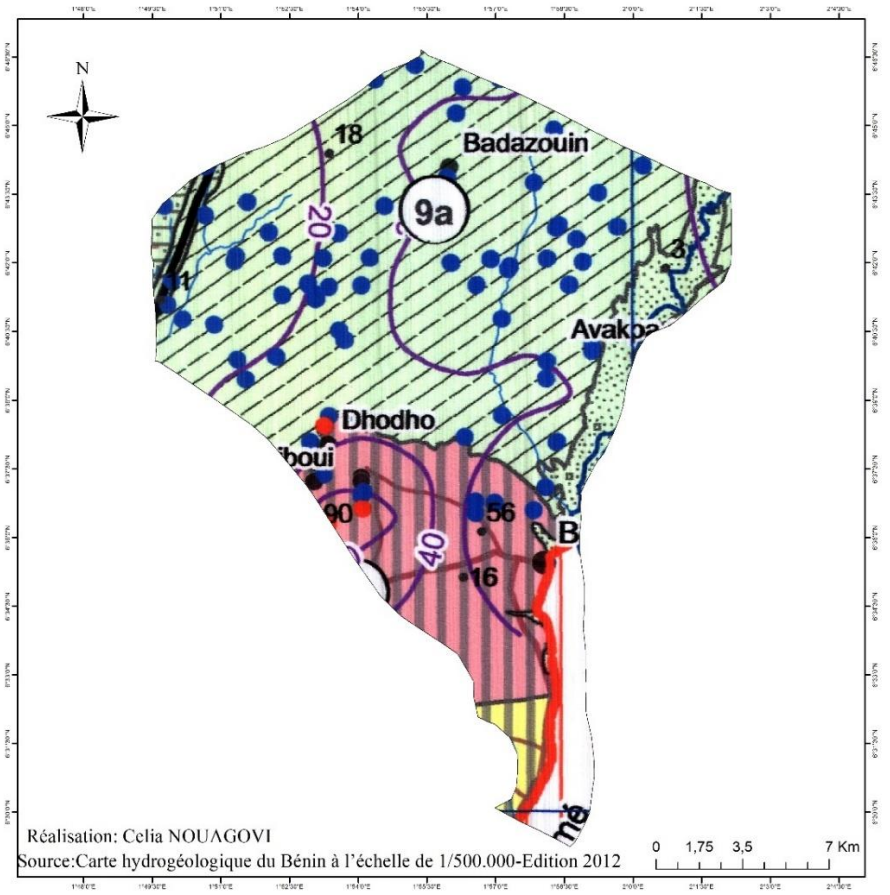
Nous dénombrons trois types d'aquifères dans la commune de Bopa. Du haut vers le bas, on a :

- Les sables du Continental Terminal : ils constituent un aquifère intéressant lorsqu'ils sont recouverts par les terrasses du Quaternaire. Ils sont captés par des puits et des forages à certains endroits dans la commune dont on peut extraire de forts débits ($20m^3/h$). Le Continental Terminal a une bonne transmissivité (10^{-3} à $4x10^{-4}$ m^2/s)

- L'aquifère de l'Eo-Paléocène est moins intéressant que celui des sables du Continental Terminal. Il est souvent constitué de calcaires qui présentent des eaux très minéralisées.

- L'aquifère du Crétacé Marin est très intéressant de par sa productivité. La transmissivité varie de 10^{-3} à 10^{-2} m^2/s.

Les niveaux statiques peuvent varier de 0 à 60m suivant les zones et on rencontre même des zones d'artésianisme dans la commune. De plus, le taux de succès dans cette commune est de 100%.



Légende:

Age	N° de la zone	Faciès, lithologie et caractéristiques des unités	Nombre de forages	Profondeur des forages (m)	Niveau de l'eau (m)	Débit spécifique Qs moyen (m3/h/m	Débit max d'essai moyen (m3/h)	% de réussite	Notes supplémentaires
Quaternaire	2b	Alluvions récentes et terrasses anciennes des dépressions de l'Ouémé, du Mono et du Couffo: sable, argile, graviers et niveaux charbonneux	159	20 à 400	7	7,3	11,6	87	En cas d'échec dans les alluvions du Quaternaire, les forages récents sont descendus dans les trois aquifères sous-jacents. Mio-Pliocène, calcaires de l'Eo-Paléocène ou sables du Crétacé
	5a	Bisseau sec des plateaux Mio-Pliocène BSC	37	50 à 400	37	1,5	7,5	54	Secteur difficile. le Mio-Pliocène est stérile. Les forages positifs dans les calcaires Eo-Paléocène ou sables du Crétacé sont profonds (moyenne 215m)
	5b	Bisseau sec du crétacé BSC	91	50 à 90	41	5,5	3,3	33	Secteur difficile. les sables Crétacé sont stériles. Les forages cherchent les zones de fracturation du socle. Taux de reussite faible
Paléocène supérieur-Eocène moyen	9a	Unités III à IV du BSC: argile kaolinique, marnes	145	50 à 280	22	5,3	10,4	96	Forages dans calcaire de l'Eo-Paléocène (aquifères discontinus) ou dans les sables du Crétacé
Paléocène inférieur et moyen	9b	Unité IIb du BSC: calcaire, intercalations sableuses et marneuses	67	60 à 180	22	17,4	10,8	91	

Figure 4 : Carte Hydrogéologique de la commune de Bopa

2.1.7. Géologie

Entièrement située dans le Bassin sédimentaire côtier, la commune de Bopa est caractérisée par les formations du Continental Terminal, de l'Eocène, du Paléocène et du crétacé. De la surface vers la profondeur, on a :

- Le Crétacé Continental : on y retrouve une alternance de formations gréseuses, sableuses à granulométrie variables, argileuses (tendres, compactes, feuilletées), sablo-argileuses ;

- L'Eocène : il est constitué de formations à faciès principalement marneux, avec des argiles grises renfermant parfois des galets de quartz ; on y rencontre également quelques niveaux de sables fins et de calcaires phosphatés difficiles à distinguer de ceux du Paléocène ;

- Le Paléocène : il est essentiellement argilo-marneux avec quelques intercalations de niveaux calcaires

- Le Crétacé Marin : il est essentiellement constitué de sables blancs, fins à grossiers et des argiles brunes verdâtres.

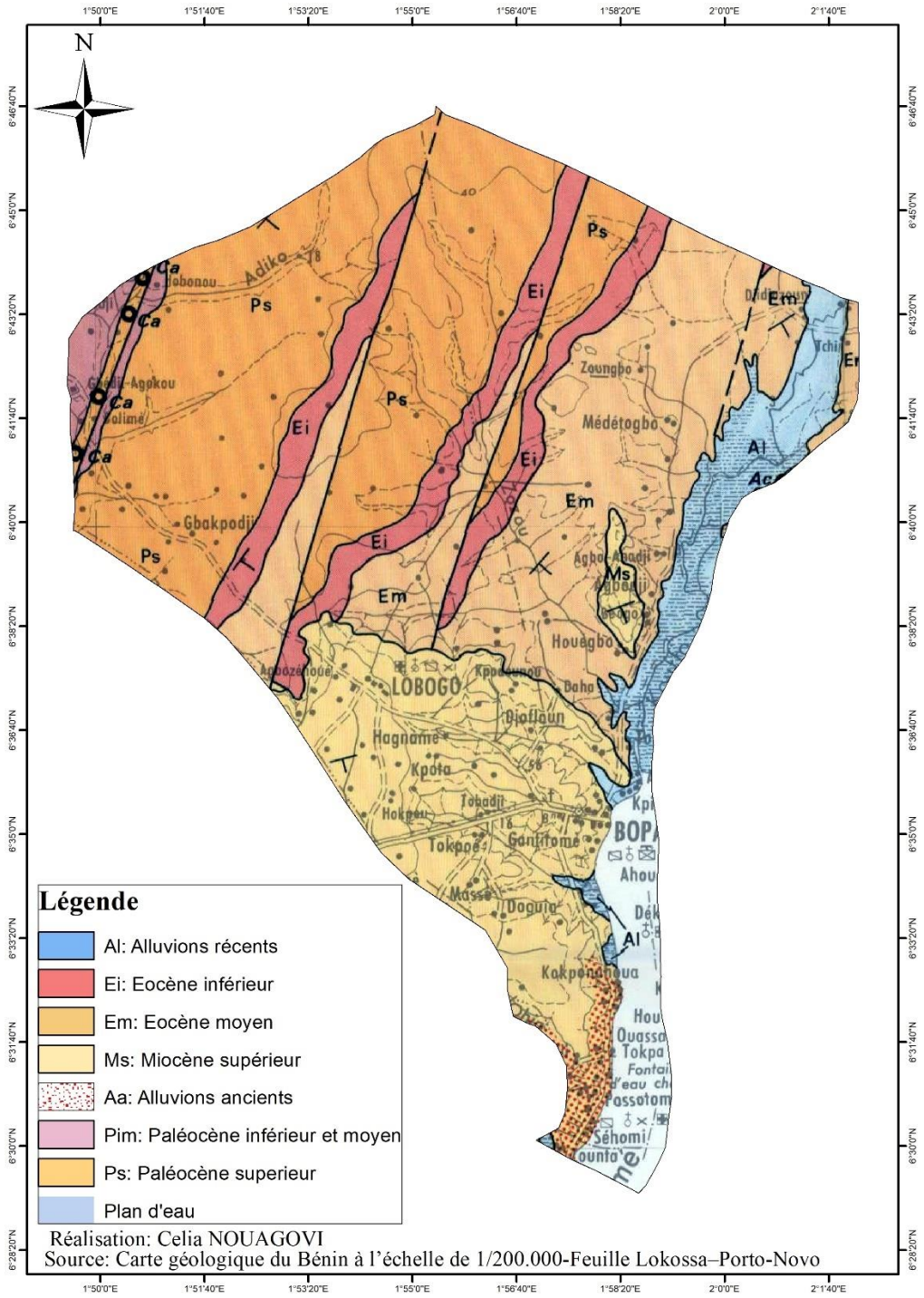


Figure 5 : Carte géologique de la commune de Bopa

2.1.8. Géomorphologie

De manière générale la morphologie du bassin sédimentaire côtier se caractérise par deux séries de plateaux repartis de part et d'autre d'une dépression médiane orientée ENE-WSW, dite dépression de Lama. Ces plateaux sont séparés les uns des autres par des dépressions liées aux principaux cours d'eau orientés Nord-Sud. Une zone de basse littorale complète l'ensemble jusqu'à l'océan. Plus précisément la commune de Bopa, comme l'ensemble des départements

du Mono et du Couffo, se situe entre la plaine côtière et la transversale de LONKLI-KETOU. C'est une région de plateau argileux et de terre de barre dont l'altitude maximale dépasse rarement 200m, avec des dépressions plus ou moins prononcées, ce qui donne à l'ensemble du relief un aspect bosselé.

De plus, la Commune de Bopa est érigée sur un ensemble d'ondulations tectoniques constituées de plateaux, de dépressions et de bassins versants. Elle présente un relief moyennement accidenté avec une altitude qui varie entre 0 et 100 mètres (figure 6). Les zones de dépression s'observent surtout dans les arrondissements de Agbodji et Bopa, et plus faiblement dans les arrondissements de Gbakpodji et Possotomè.

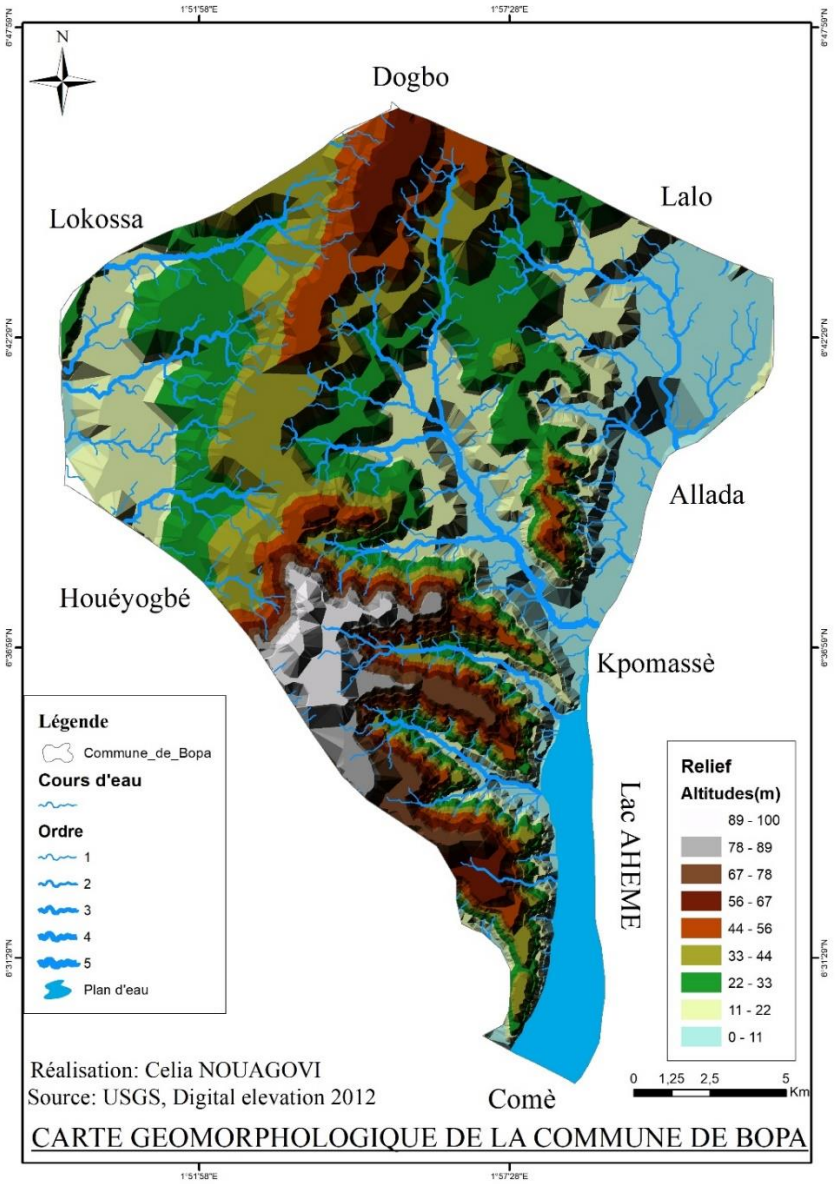


Figure 6 : Carte géomorphologique de Bopa

2.1.9. Population

Le tableau démographique de la Commune de BOPA suivant les données du Quatrième Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH4) présente un effectif global de 96.281 habitants. La population féminine s'augmente d'année en année par rapport à celle masculine. Si en 1992, la gent féminine dépassait de 1290 celle masculine, ce dépassement a presque doublé en 2002 et a atteint un effectif de 2216.On en déduit donc un taux d'accroissement annuel du 3,65% du sexe féminin sur le sexe mâle.

Le taux d'accroissement annuel de la population de BOPA est de 1,37%. L'analyse de la pyramide des âges montre que la population est très jeune. Plus de sa moitié regroupe les jeunes de moins de 15 ans. Cet indicateur est un facteur de dynamisme mais aussi un problème majeur de développement de la commune, du fait des défis qu'il représente pour la scolarisation, l'accès au soin de santé et à l'emploi pour ne citer que ceux-là. Un autre élément caractéristique de la démographie est l'exode rural qui touche essentiellement la population active comprise entre 14 et 40 ans avec ses conséquences négatives sur l'économie locale.

En ce qui concerne les groupes ethniques majoritaires, nous avons les Sahouè venus de Honhoué, de Dakpla et de Doutou dans des vagues migratoires du XVIIIe siècle pour s'installer dans tous les arrondissements de la commune ; ensuite les xwéla ou xwéda venus de Guézin, les aïzo venus d'Allada, les kotafon venus d'Agamè, les Adja qui pour des activités commerciales s'installent de plus en plus dans la commune. A ces groupes, il faut aussi ajouter les Yoruba, Ibo, dendi, guen, goun, watchi et Peulh. Il est remarquable de constater que sur les lieux d'installation, chacun a perdu une partie de son originalité pour vivre en parfaite harmonie avec l'autre groupe linguistique.

Au plan religieux, on distingue deux sortes de religions à savoir les religions traditionnelles et les religions modernes.

Les religions traditionnelles sont pratiquées par 54% de la population. Il s'agit de hèviosso, ogou, toholou, sakpata, dan, djagli, azon, cocou. Le recrutement des adeptes se fait au sein de la population selon des motivations spécifiques. Ces adeptes séjournent d'un à cinq ans dans les couvents où ils restent au service des chefs féticheurs sauf pour cocou, djagli et azon qui pratiquent une initiation d'une à deux semaines. L'adepte reçoit certaines formations dans l'éducation (le respect de l'autorité, le respect du bien public, la discipline du groupe, etc.) ; dans l'artisanat (vannerie ; tresse de nattes, chapeaux, couffins, etc.). Par contre, ce long séjour dans les couvents bloque parfois l'accès à l'instruction, à la formation professionnelle et réduit

pour la période, la contribution des intéressés au développement économique et social du milieu.

Au titre des religions étrangères, on distingue le christianisme (44,7% en global) et l'islam (1,3%). Elles prônent l'amour du prochain et le rapport entre l'individu et l'Être suprême.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Matériels

Pour mener à bien notre travail, nous auront besoin des matériels suivants :

- Des rapports, thèses, articles et documents sur les études géologiques et hydrogéologiques antérieures effectués
- Des outils de SIG tels que ArcGIS et Qgis pour la réalisation des cartes
- D'un GPS pour enregistrer les coordonnées géographiques du terrain
- D'un thermomètre pour prendre la température des eaux
- De papiers millimétrés pour faire des coupes géologiques à partir des données de forages
- De crayons
- De gomme
- De règle graduée
- D'une rose des vents
- Des coordonnées géographiques de forages réalisés dans la commune
- Des données lithologiques des forages réalisées dans notre zone d'étude
- D'un ordinateur
- Du pack office (Word, Excel, Powerpoint) pour la rédaction du travail proprement dit

2.2.2. Méthodologie

Pour atteindre les objectifs que nous avons définis, nous avons suivi une approche méthodologique structurée en trois étapes majeures : la recherche documentaire, la collecte des données et le traitement de ces dernières

2.2.2.1 Recherche documentaire

A ce niveau, nous avons eu à faire des recherches sur les mémoires, thèses, articles, études, rapport et tout autre publication abordant les questions d'artésianisme, d'eau chaude, d'eau tiède et d'eau froide dans le monde et au bénin en général mais plus particulièrement sur Bopa mais nous avons aussi élargi nos recherches sur le net pour mieux cerner les concepts impliqués dans notre étude , de connaitre les aspects du sujet déjà abordés et de faire un bilan des acquis

dans le domaine. Ces travaux nous ont permis d'avoir une meilleure compréhension du sujet et de mieux nous orienter dans la collecte, le traitement et l'analyse des données.

2.2.2.2. Collecte des données

Pour mener à bien notre étude, nous avons eu à collecter les données qui suivent :

- Les données brutes issues de la réalisation des forages représentatifs de la commune de Bopa que nous avons eues de la BDI. De cette base de données, nous avons extrait le résumé technique des différents forages donnant des renseignements sur la localisation, la profondeur forée, la couche aquifère captée et la lithologie.
- La carte topographique de la zone que nous avons généré à partir du logiciel de SIG ArcGIS
- Les données géologiques que nous avons eu de la feuille Lokossa-Porto à l'échelle 1/200000
- Les données hydrogéologiques que nous avons eu de la carte hydrogéologique du Bénin à l'échelle 1/500000

2.2.2.3. Traitement des données

Toutes les données collectées sont traitées ici en fonction du résultat recherché. Les données collectées lors de nos travaux ont permis de réaliser des coupes hydrogéologiques et des cartes de répartition spatiale. Suivant la nature des données, et en fonction du type de résultat recherché, un outil spécifique de traitement a été adapté.

a. Réalisation d'une carte présentant les forages de la commune de Bopa

Après analyse des données techniques issues de la BDI, nous avons recensé 198 forages réalisés dans la commune. Mais nous n'avons projeté que 100 après tri car ce sont eux qui présentent une lithologie bien détaillée. Nous les avons projetés sur la carte topographique de Bopa que nous avons générée par le logiciel de Système d'Information Géographique ArcGIS

b. Tracé des traits de coupe

Sur la carte topographique, nous avons tracé des traits de coupes en faisant attention à ce que toute la commune soit considérée mais aussi en priorisant les traits par lesquels passent le maximum de forages représentatifs.

c. Réalisation de coupes hydrogéologiques

Une fois que la carte avec les traits de coupe a été établie, nous avons tracé les profils topographiques le long des traits de coupe puis nous avons projetés sur ces profils les logs des

forages situés sur ou au voisinage de son tracé. Ensuite, nous avons procédé à une corrélation des faciès identiques d'un log de forage à un autre pour mettre en évidence les différentes couches superposées.

d. Analyse de la corrélation entre la géologie locale et la distribution des forages artésiens

Là, nous ferons un recensement des endroits où on note une distribution importante des forages artésiens. Puis, suite à une étude de la géologie locale, nous ferons ressortir l'impact que cette dernière a sur l'artésianisme

e. Evaluation de l'impact de la géologie locale sur la température des eaux souterraines

Il s'agira à ce niveau d'analyser la géologie et la température des eaux de la commune de Bopa. Ensuite, nous ferons une synthèse des interactions entre la géologie et la température des eaux souterraines

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3. Résultats

3.1. Projection des forages de la zone d'étude sur carte topographique

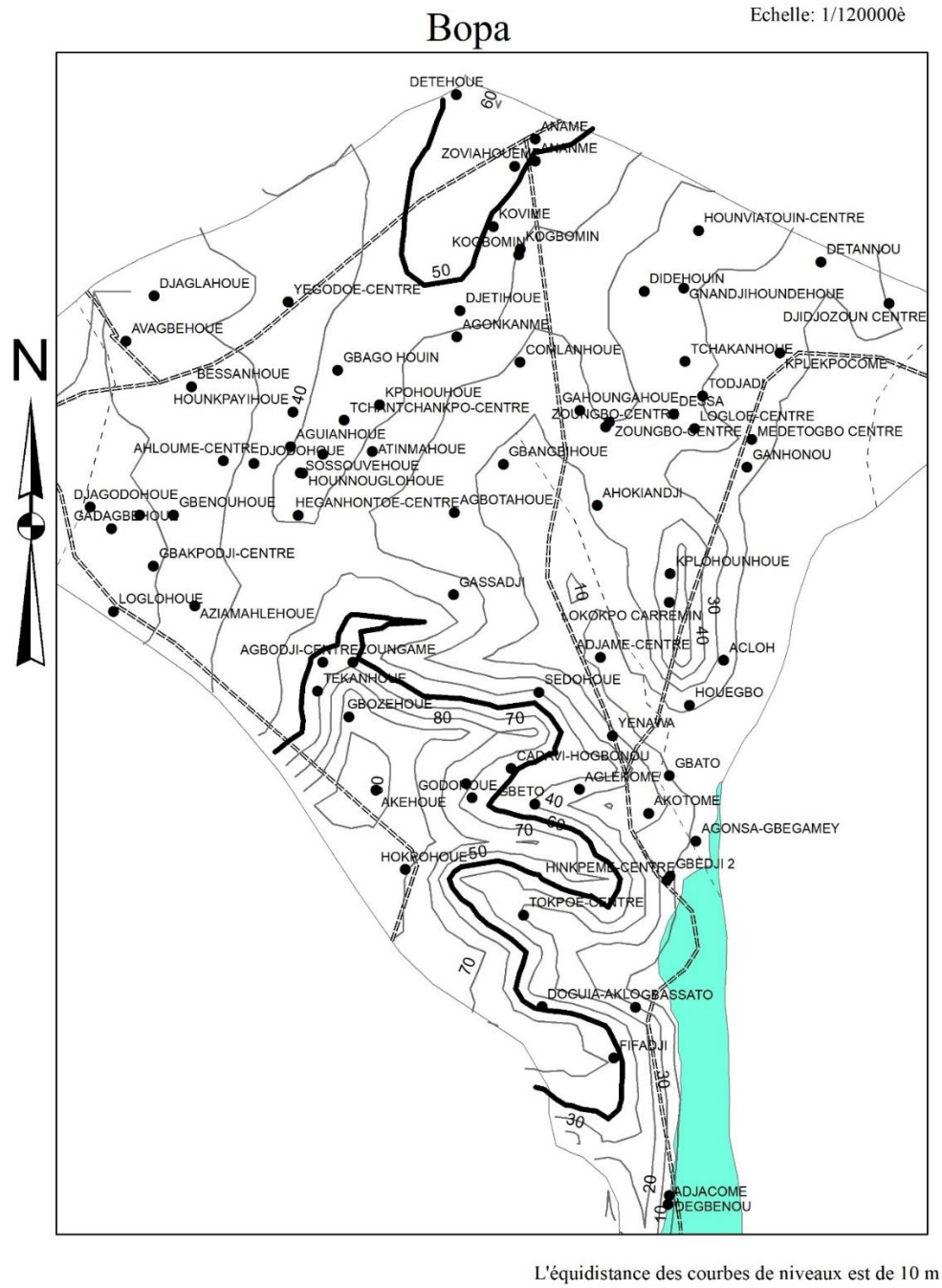


Figure 7 : Carte topographique de Bopa présentant les forages

En fonction des données viables, nous avons pu représenter 100 forages sur 198 forages recensés dans la commune

3.2. Représentation des traits de coupes sur carte topographique

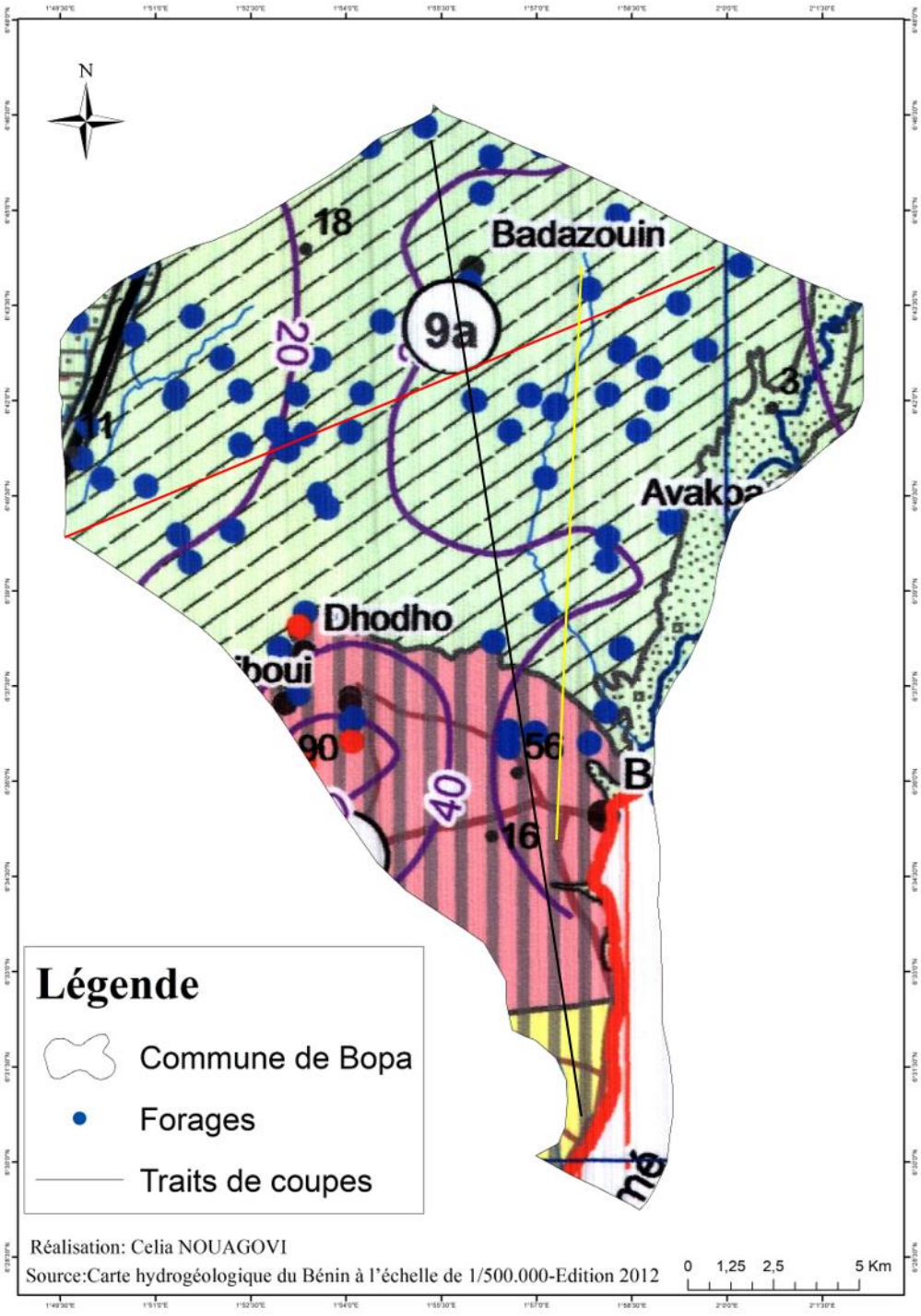


Figure 8 : Traits de coupe

Trois traits de coupes représentatifs de la commune ont été tracés

3.3. Corrélations litho stratigraphiques et coupes hydrogéologiques

Coupe 1 : WSW-ENE

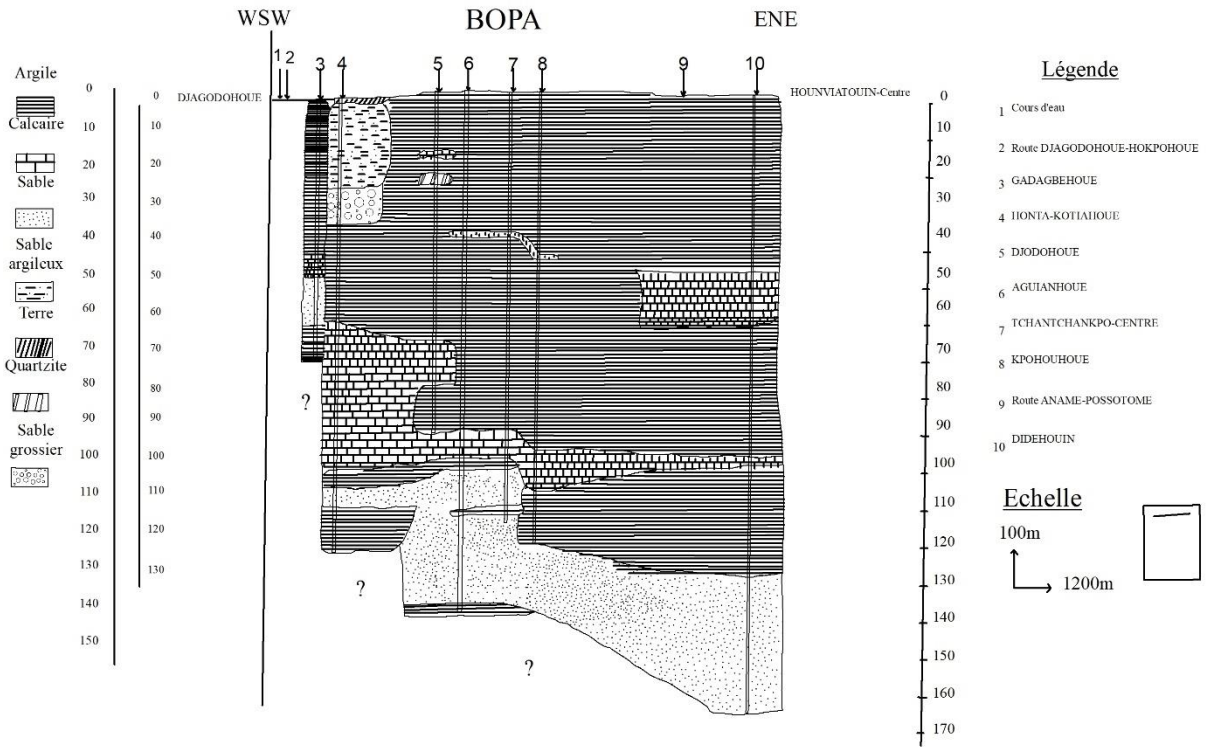


Figure 9 : Coupe 1

L'analyse de cette coupe révèle que, sur le tronçon que nous avons considéré suivant la direction WSW-ENE, les formations récurrentes sont l'argile, le calcaire et le sable. L'argile qui à elle seule tend à faire 80% de la coupe, contient des poches de sable argileux mais présente aussi des intrusions de calcaires par endroits. Le sable quant à lui, en dehors des deux premiers forages où il est entre 48 et 61m de profondeur pour le forage de GADAGBEHOUE et entre 26 et 34m de profondeur pour le forage de HONTA-KOTIAHOUE, il se retrouve en profondeur dans le sol à partir de 105m pour les autres forages. Sur ce tronçon, la profondeur des forages est comprise entre 71m et 167m.

Coupe 2 : NNE-SSE

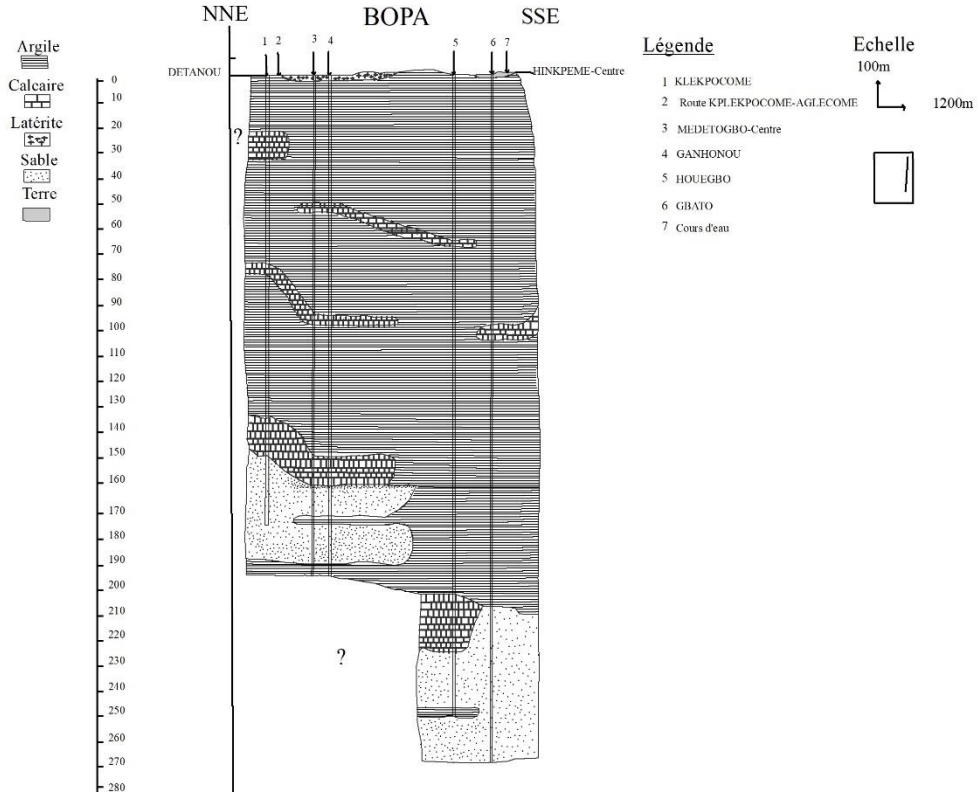


Figure 10 : Coupe 2

Tout comme la coupe précédente, l'analyse de cette coupe a révélé que les formations récurrentes sont l'argile, le calcaire et le sable. L'argile recouvre 80% de la coupe et présente de légères intrusions de calcaire par endroits. Les forages de cette coupe sont nettement plus profonds que ceux de la première coupe. Le moins profond s'arrête à 174m en profondeur tandis que le plus profond s'arrête à 269m dans le sol. Puis on retrouve le sable à 150m et à 207m de profondeur respectivement. La stratigraphie de cette coupe en quittant la surface de la terre suit un schéma assez simple. Autrement, après l'argile qui présente des intrusions de calcaire, nous tombons sur le sable puis sur de l'argile pour les forages de MEDETOGBO-Centre, de GANHONOU et de HOUEGBO.

Coupe 3 : N-S

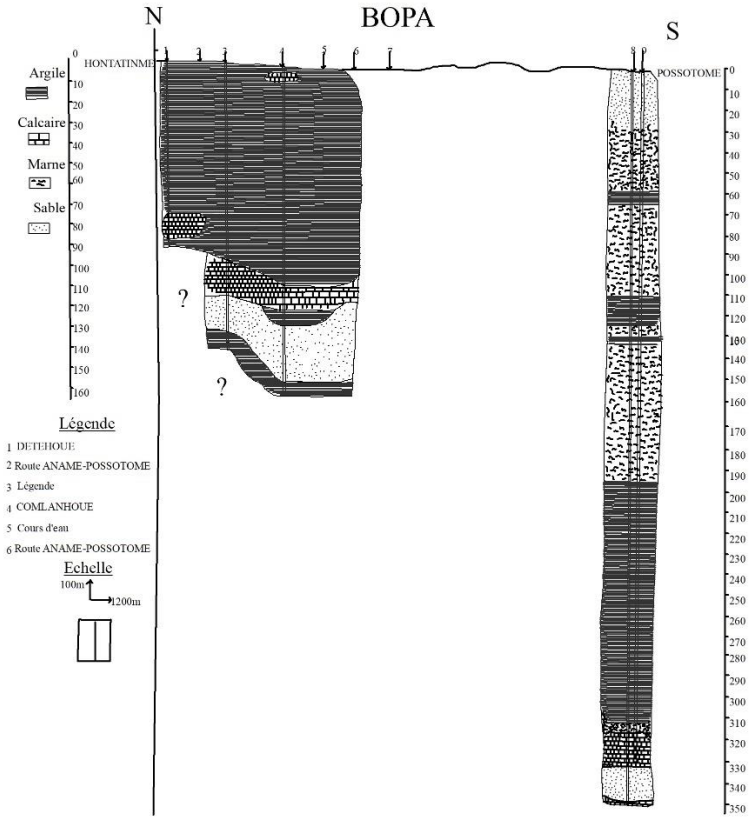


Figure 11 : Coupe 3

L'analyse de cette coupe fait ressortir, tout comme les autres coupes au niveau des trois premiers : DETEHOUE,KOVIME et COMLANHOUE, la succession respective de l'argile, du calcaire et du sable. Les aquifères captés sont ainsi captifs en fonction du caractère imperméable des formations qui les précèdent. L'aquifère capté est l'Eo-Paléocène.

Pour ce qui est des forages de DEGBENOU et de ADJACOME, on remarque que contrairement aux autres forages représentés, ils sont très profonds et ont une profondeur supérieure à 300m, en ce qui concerne la stratigraphie en quittant la surface, après le sable, on remarque une alternance d'argile et de marne jusqu'à 194m de profondeur puis de l'argile sur plus de 100m

avant de trouver du calcaire, dans lequel le forage de ADJACOME à capté l'aquifère, et enfin du sable qui constitue l'aquifère du forage de DEGBENOU. L'aquifère capté est le crétacé

3.4. Identification des forages artésiens

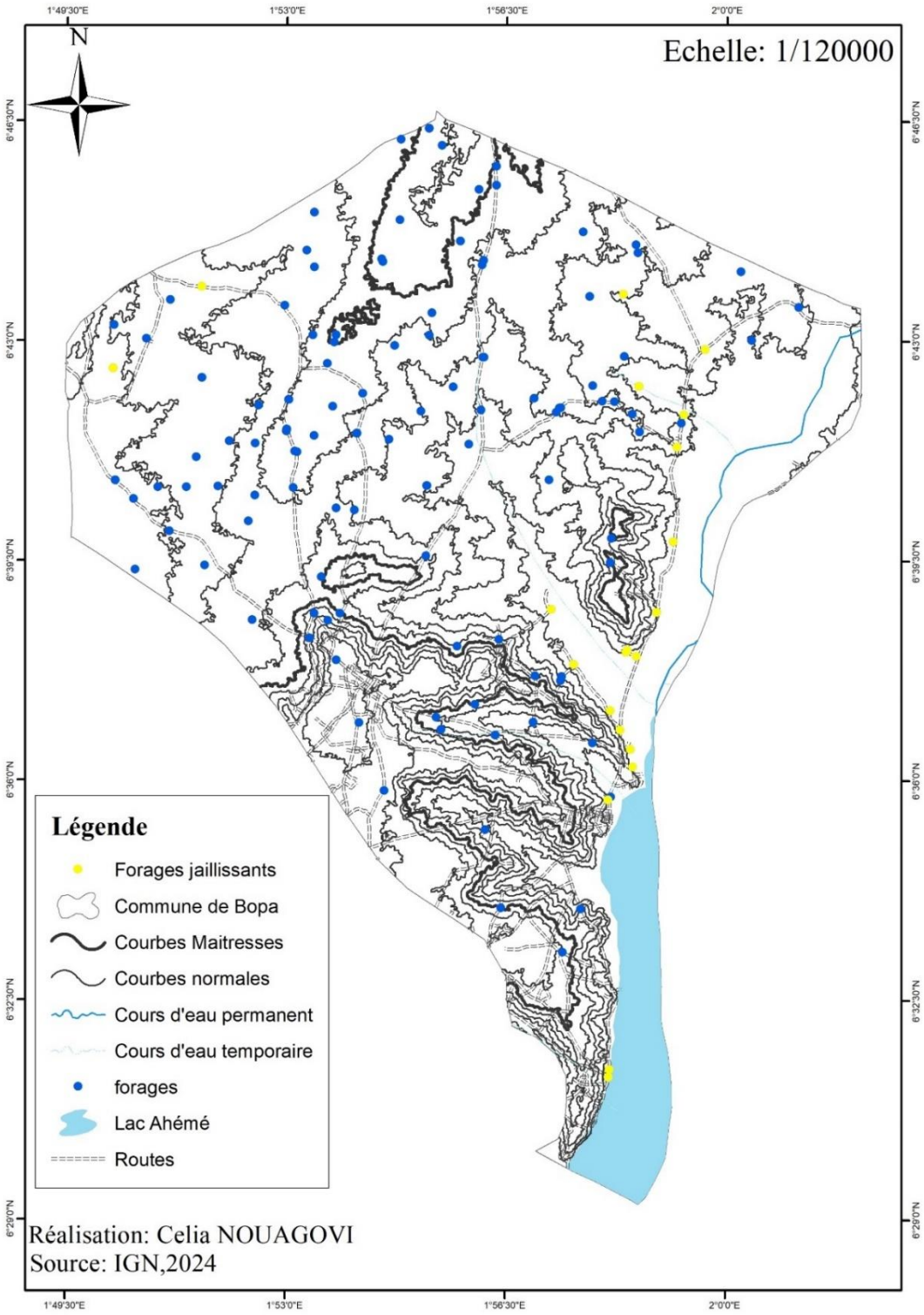


Figure 12 : Carte topographique mettant les forages artésiens en évidence

Les forages artésiens, représentés en jaune, que nous avons pu recensés sont au nombre de 22 sur un total 100 forages . On note de l'analyse des données techniques que le niveau statique de la plupart de ces forages varie entre -14,77 et 1m. On remarque aussi que les forages qui ont captés un aquifère à artésianisme jaillissants sont situés du Nord-Ouest au Sud-Ouest de la commune, où ils vont en diminuant. Puis en superposant les forages artésiens à la carte hydrogéologique, certains ont captés l'aquifère du crétacé supérieur tandis que d'autres ont capté l'Eo-paléocène.

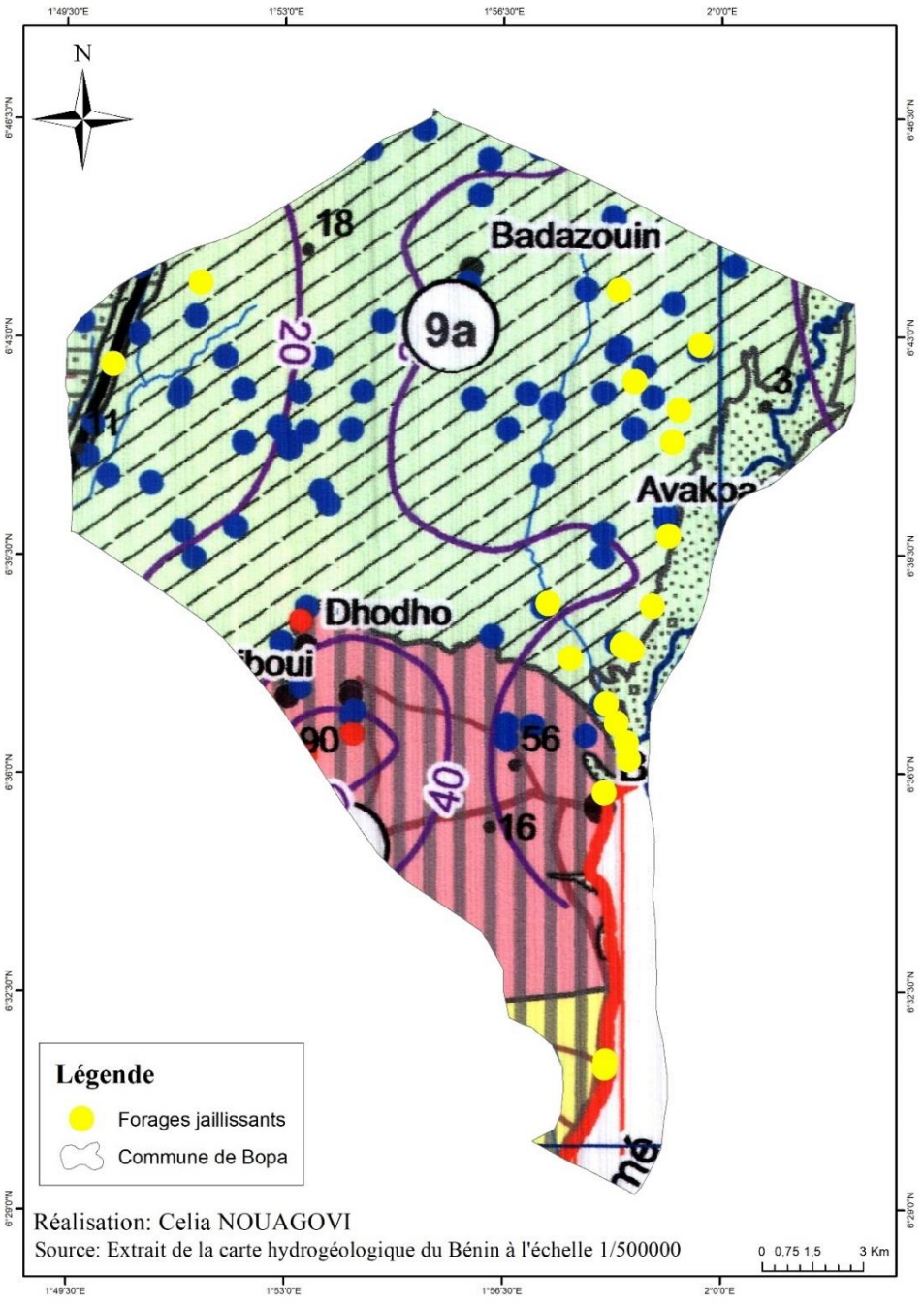


Figure 13 : Carte hydrogéologique mettant les forages artésiens en évidence

3.5. Analyse topographique des aquifères artésiens

L'analyse de l'altimétrie de la commune de Bopa, combinée à la distribution des forages, révèle que la commune possède une topographie unique qui impacte directement la disponibilité et l'accès à l'eau souterraine. En effet, on remarque que les forages à artésianisme jaillissants se localisent dans les zones de basse altitude de la commune soit entre -5 et 29m d'altitude

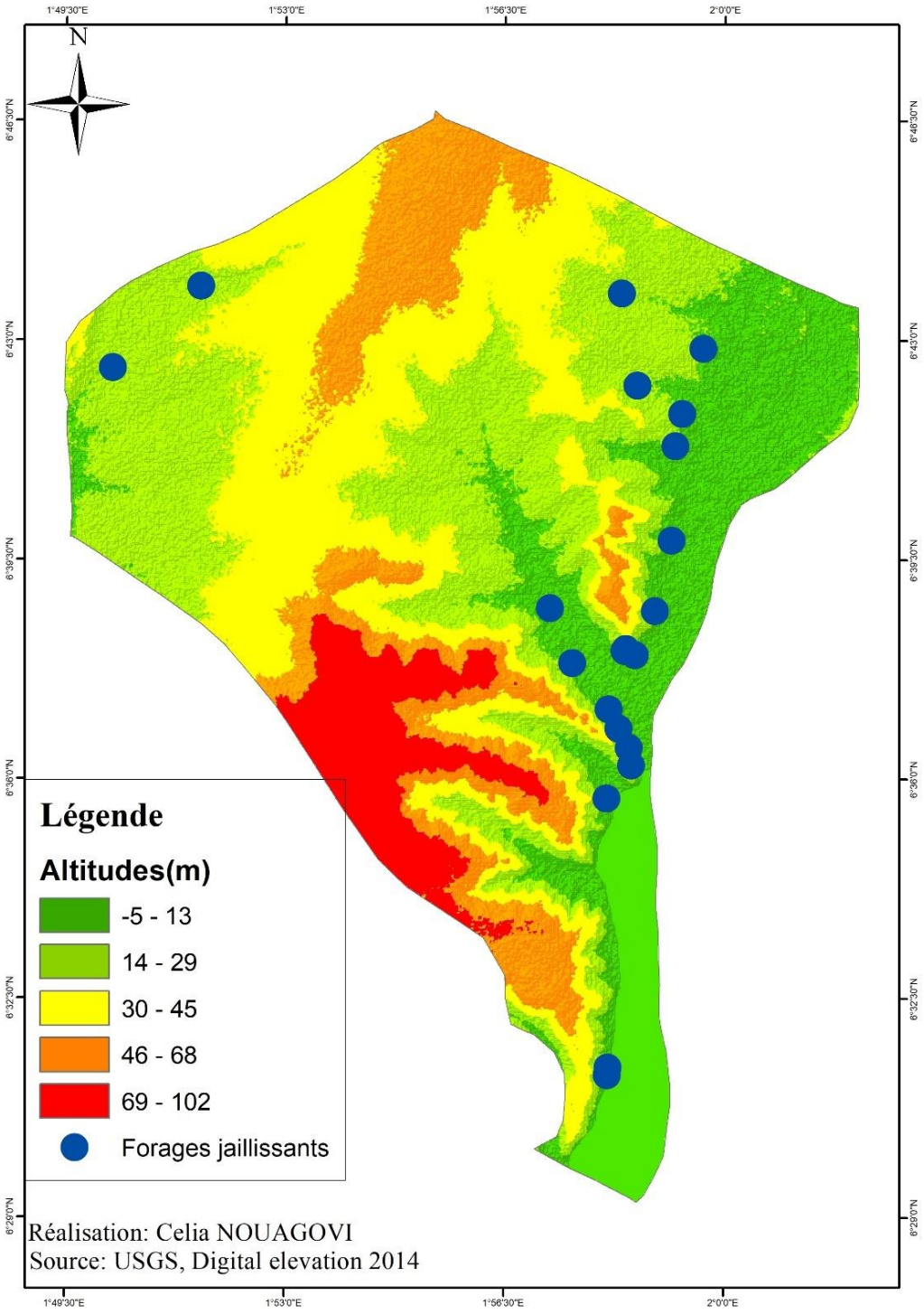


Figure 14 : Carte altimétrique mettant les forages artésiens en évidence

3.6. Analyse de la géologie sur les forages artésiens

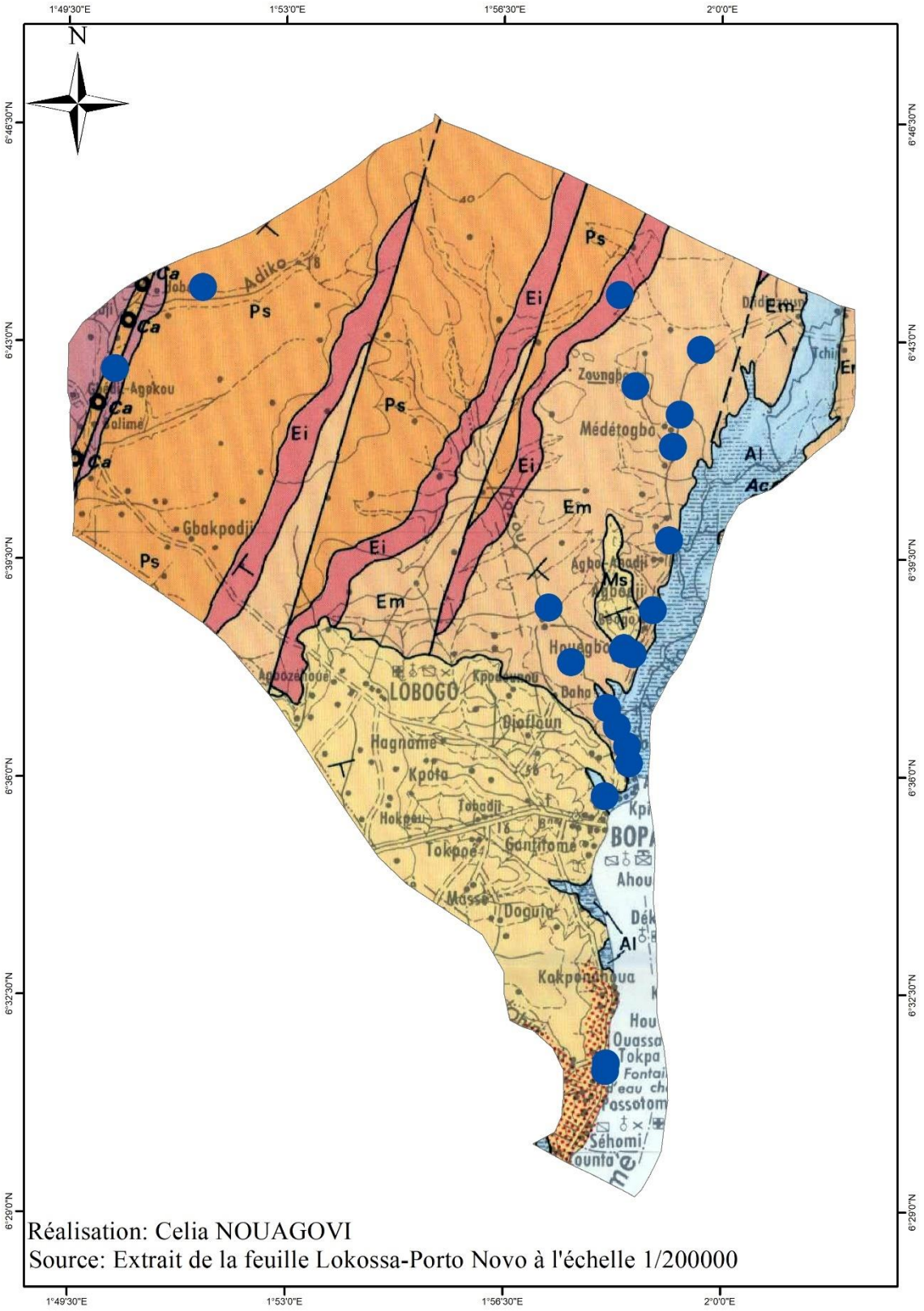


Figure 15 : Carte géologique mettant les forages artésiens en évidence

On remarque que les forages artésiens se localisent au niveau de l'Eocène moyen, de l'Eocène inférieur, du Paléocène supérieur et du Miocène supérieur.

3.7. Analyse des interactions entre les formations du sous-sol et les températures des eaux souterraines

Il est dit que le phénomène responsable de l'augmentation de la température des eaux souterraines est le gradient géothermique. En effet, la température augmente de 3°C tous les 100 mètres de profondeur en moyenne. La température de la commune étant de 25°C en moyenne et la plupart des forages de la commune ayant 100m de profondeur en minimum, la température des eaux serait donc de 28°C. Ce qui n'est généralement pas le cas. Puis, il est évident que pour les eaux dont la température excède les 37°C le gradient géothermique n'explique pas tous les phénomènes thermiques des eaux du sous-sol. En effet, les forages les plus connus et les plus profonds de la commune qui captent les aquifères à 570m pour Bopa et 320m pour possotomè, devraient faire ressortir des eaux de 40°C et de 34°C en suivant le gradient géothermique. Ce qui est infirmé car les eaux de ces forages ont une température de 46°C et de 55°C respectivement. Ainsi, outre le gradient géothermique, un autre phénomène entre en jeux. De plus, toute hypothèse de volcanisme devrait être immédiatement réfutée car le Bénin est sur un Craton, celui de l'Afrique de l'Ouest. Néanmoins, l'analyse de la carte de fracturation de la commune de Bopa, montre que les forages produisant des eaux de plus de 35°C sont sur des Fractures profondes. S'il est vrai que ces fractures favorisent la diffusion de la chaleur dans les aquifères en contact [8], la chaleur devrait s'évaporer après diffusion, ce qui n'est pas le cas.

4. Discussion

D'une part, les forages artésiens sont généralement situés du Nord-Est au Sud-Est de la commune où ils vont en diminuant. Cette distribution correspond, sur le plan altimétrique, à la zone où la commune présente de faibles altitudes, voire est en dépression. Ensuite, sur le plan géologique, les formations que traversent ces forages, c'est-à-dire l'Eocène moyen, l'Eocène inférieur, le Paléocène supérieur et le Miocène supérieur, présentent la particularité d'être composés essentiellement de dépôts imperméables tels que l'argile, l'argile kaolinique, le grès et le marne puis du sable et du calcaire par endroits. Puis, les coupes réalisées, particulièrement la coupe 2 qui suit la direction NNE-SSE qui ne représente que des forages jaillissants et la coupe 3 qui suit la direction N-S nous donnent plus de précisions sur ces derniers. Tout d'abord, on remarque que ces forages sont particulièrement profonds et selon leur stratigraphie les

aquifères captés sont recouverts d'épaisses couches imperméables. Ainsi, ces forages ont capté des nappes captives. Par corrélation avec la carte hydrogéologique, ces forages artésiens ont par conséquent captés l'aquifère du crétacé captif sous les argiles, graviers et grès du Mio-Pliocène mais aussi l'aquifère de l'Eo-Paléocène captif sous les argiles et marnes du paléocène inférieur-moyen et de l'éocène inférieur[9, 10]. Ensuite, la nature captive de ces aquifères résultant de leur position stratigraphique entre le socle cristallin sous-jacent et les argiles, graviers, grès et marnes sus-jacentes, joue un rôle crucial dans le phénomène d'artésianisme observé. En effet, cette configuration en "sandwich" crée les conditions de pression nécessaires pour que l'eau remonte naturellement dans les forages. Cela est prouvé par les valeurs négatives et bases des niveaux statiques (comprises entre -14,77 et 1) de ces forages. De plus, la diminution progressive du nombre de forages artésiens vers le Sud de la commune, notamment dans les zones où affleurent le Mio-pliocène, ainsi que la profondeur des forages réalisés sur ce tronçon attestent que l'aquifère du Crétacé est très profond. Ainsi, bien qu'il soit captif, sa profondeur rend le captage plus difficile.

Par suite, la configuration topographique de la commune présentant une dépression à l'est puis au sud de la commune, combiné à sa composition géologique créent les conditions de confinements nécessaires à l'artésianisme. De plus, les formations de l'Eocène inférieur, du Paléocène inférieur-moyen et du Mio-Pliocène qui recouvrent les aquifères captés exercent une telle pression sur ceux-ci que associés aux premières conditions, les eaux de ces forages jaillissent naturellement.

D'autre part, le gradient géothermique, en théorie, permettrait aux eaux des forages qui font 100m de profondeur d'atteindre une température de 28°C ce qui n'atteint pas encore la température optimale pour avoir une eau tiède ou même une eau chaude. Ceux qui captent les eaux à plus de 200m de profondeur, atteignent une température de 31°C, à ce niveau on peut avoir de l'eau tiède. Quant à ceux qui captent les eaux à plus de 300m pour les forages de Possotomè la température devrait être de 34°C. Tandis que celui qui capte l'aquifère à 570m de profondeur à Bopa devrait atteindre une température 40°C. En suivant ces approximations et la réalité seuls certains forages de la commune qui ont captés un aquifère à 100m respectent la condition du gradient géothermique. Pour tout le reste, ils subissent l'effet de la pression. Car la pression est proportionnelle à la température selon la loi de Gay-Lussac. En effet, cette loi stipule que « *A volume constant, l'augmentation de pression d'un gaz parfait est proportionnelle à l'élévation de la température » [*15] et est illustrée par la formule qui suit *:*

$$\frac{P}{T} = Cste.$$

Néanmoins, il est important de noter que dans la réalité il n'existe pas de gaz parfaits ainsi, aux conditions normales de température et de pression les gaz réels se comportent tous plus ou moins de la même façon que le gaz parfait. Autrement si la température augmente, la pression aussi augmente et vice versa. Donc appliquée au cas de notre commune, plus la pression exercée sur les aquifères augmente, plus la température des eaux de ces nappes augmente également. Ainsi, sous l'action des formations imperméables qui empêchent tout échange de chaleur avec l'extérieur (compression adiabatique) [17] suivi de l'effet du gradient géothermique qui élève déjà légèrement la température à près de 28°C, la pression exercée sur les aquifères élève la température de sorte à ce que la température monte jusqu'à 37°C. Ce qui rend indubitablement l'eau tiède.

En ce qui concerne le forage de 320m de Possotomè et celui de 570m de Bopa, la température et la profondeur à laquelle ils ont capté les aquifères ne permettent pas d'utiliser le gradient géothermique pour expliquer leur caractère thermal. Bien qu'on admette que l'enfoncement en profondeur de l'aquifère du crétacé confère aux eaux du forage de 570m de Bopa, un caractère thermal sous l'effet du gradient géothermique[11], cela n'est pas suffisant car ce forage de même que celui de Possotomè se localisent sur des fractures. La présence des fracturations profondes favorise la diffusion de la chaleur dans les aquifères en contact[8]. Par conséquent, les fracturations profondes chauffent l'aquifère pendant que le toit imperméable par compression adiabatique empêche cette chaleur de s'évaporer et que la pression la condense. A ce niveau, le sous-sol agit comme un autocuiseur (une cocotte-minute). En effet dans une cocotte-minute, de la chaleur est ajoutée à l'eau et à cause du couvercle hermétique, la pression monte car la vapeur ne peut s'échapper. Cette pression permet de cuire les aliments plus rapidement (https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Autocuiseur). Dans ce cas de figure, la chaleur fournie par les fracturations est assez faible pour que l'eau atteigne une température d'ébullition. Mais combinée à l'effet du gradient géothermique, elle est assez importante pour que l'eau revête un caractère thermal.

Pour conclure, les forages de la commune de Bopa produisent trois (03) types d'eaux en fonction de la température. On a les eaux froides qui subissent l'effet du gradient géothermique et peu d'effet de la part des formations géologiques de sorte à ce que bien qu'on note une augmentation de température, celle-ci est légère. Puis les eaux tièdes qui subissent non

seulement l'effet du gradient géothermique mais aussi celui de la pression qu'exerce les formations imperméables sur les eaux. Enfin, les aux chaudes qui combinent la géothermie, la pression et les fracturations profondes pour avoir ce caractère.

Conclusion

L'étude que nous avons menée nous a permis de mettre en évidence l'influence que la géologie de la commune de Bopa exerçait sur son hydrogéologie. Les résultats que nous avons obtenus nous ont montrés que l'artésianisme de la commune était provoquée par la position confinée des aquifères mais aussi par sa disposition topographique, car la commune est une zone de basse vallée. De plus, nous avons retenus que la température des eaux du sous-sol ne dépend pas que du gradient géothermique ou des fractures profondes, mais ils dépendent aussi de la pression exercée sur les aquifères par les formations imperméables. Cette pression multiplie/ exacerbe les effets du gradient géothermique combiné aux fracturations profondes pour qu'on ait de l'eau chaude, elle augmente l'effet du gradient géothermique pour qu'on ait de l'eau tiède et agit peu dans les cas où on a de l'eau froide. Ainsi, au vu des résultats obtenus, toutes les hypothèses que nous avons émises ont été confirmées. Cependant, au cours de notre étude, nous avons été confrontés à certaines difficultés qui nous ont poussé à formuler les suggestions qui suivent :

- La réactualisation de la base de données intégrée pour plus de précision et de transparence
- La création d'une bibliothèque libre et facile d'accès aux étudiants

Pour ce qui est des eaux thermales, nous suggérons qu'elles soient utilisées de manière optimale en mettant en place des stations balnéaires pour cures thermales. Cela attira beaucoup de monde et donc contribuera à l'économie locale voire nationale.

Références

Bibliographie

[1] Eaux souterraines, rendre visible l'invisible ; UNESCO, 2022

[2] Agenda 2030 de développement durable, ONU, 2015

[3] Principes et méthodes de l'hydrogéologie, p46 Gilbert Castany, 1998

[4] Cours d'hydrogéologie, G. de Marsily, Université P. & M. Currie, septembre 2004

[5] WHO Guidelines For Grinking-water Quality, 4th édition, Organisation Mondiale de la Santé,2011

[6] MYRAND, 2008

[7] MONOGRAPHIE COMMUNALE DE BOPA, DJENONTIN Ignace, Mars 2006

[8] Facteurs de contrôle de l'hydrothermalisme sélectif des aquifères jaillissants du Bassin Sédimentaire Côtier du Bénin, Afrique de l'Ouest, Prudence Mahutondji DOSSOU Crépin ZEVOUNOU, Abdoukarim ALASSANE, Christophe KAKI, Moussa BOUKARI et Daouda MAMA, Afrique SCIENCE 21(3) (2022) 100 - 113

[9] Carte hydrogéologique du Bénin –MERPEMEDER- 2012 à l'échelle 1/500000

[10] Carte géologique du Bénin-Feuille de Lokossa- Porto-Novo à l'echelle1/200000

[11] M. BOUKARI, hydrogéologie de la république du Bénin, Africa Géoscience review, Vol. 14, N°3 (2007), pp 303-328

[12] PLAN DE DEVELOPPEMENT COMMUNAL 2018 – 2022, Décembre 2017

[13] Spatialisation des cibles prioritaires des ODD au Bénin : Monographie des communes des départements du Mono et du Couffo, Note synthèse sur l'actualisation du diagnostic et la priorisation des cibles des communes

[14] Cahier des villages et quartiers de ville Département du MONO

[15] Dr HENNI MANSOUR, Cours de Thermodynamique, chapitre III

[16] TP loi de Gay Lussac , 2^{e} B et C

[17] Le premier principe de la thermodynamique, Marie-Paule Bassez

[18] Prof. ALASSANE Abdoukarim, Dr. SAMBIENOU Gédéon, COURS DE GEOLOGIE APPLIQUEE : EAUX SOUTERRAINES, Université Nationale des Sciences Techologie Ingénierie et Mathématique, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, 2020-2021

[19] FORATION ET EQUIPEMENT DE FORAGES D'EAU, Félix V. AZONSI, 2024

CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES HORIZONS AQUIFERES DE LA COMMUNE DE ZE, Léogis E.T. DOVONON, 2022

GLINTZBOECKEL et A. SYSSAU, Etude géologique et hydrogéologique du domaine des Treilles, Tourtour-Flayosc,Ch., BRGM , Marseille, Février 1974

Bhavani Bénard, Caractérisation du système hydrothermal du Piton des Neiges par des méthodes géochimiques et isotopiques, Sep 2020

François-D. VUATAZ, HYDROGÉOLOGIE ET CIRCULATIONS HYDROTHERMALES EN MILIEU FISSURÉ, septembre 1993

Camille Doublet , Fonctionnement d'un système hydrothermal hyperminéralisé en contexte alpin : Salins-les-Thermes, Savoie (France) : caractérisation hydrogéologique, hydrogéochimique et hydrodynamique en vue de la gestion de la ressource, Décembre 2016

Léon Moret, LES SOURCES THERMOMINÉRALES, Hydrogéologie - Géochimie – Biologie, 1945

Gédéon Wèré SAMBIENOU, ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN DE LA PENDJARI : IDENTIFICATION DES AQUIFERES ET VULNERABILITE A LA POLLUTION

Webographie

[20] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Hydrothermalisme#

[21] https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Source_chaude

https://fr.wikipedia.org/wiki/Puits_artesiens

https://www.gouv.bj/article/1002/destination-benin---bopa-cite-bleu

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Gradient_g%C3%A9othermique

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Craton

https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8355524/eau-froide#:~:text=D%C3%A9finition,sup%C3%A9rieure%20%C3%A0%2025%20%C2%B0C

https://www.aqueduc.info/Que-faire-des-sources-d-eaux-thermales-beninoises

https://mariannetardif.wordpress.com/2019/09/28/eau-thermale-de-possotome-et-lac-aheme/

https://www.voyage-benin.com/guide-benin/destination/possotome

https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17574136/artesianisme

https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Autocuiseur

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre 1 : clarification conceptuelle 4

1.1. Clarification conceptuelle 5

1.1.1. Artésianisme : 5

1.1.2. Gradient géothermique : 5

1.1.3. Aquifère : 5

1.1.4. Nappe captive : 5

1.1.5. Forage : 5

1.1.6. Source chaude : 6

1.1.7. Craton : 6

1.1.8. Eau Froide : 6

1.1.9. Eau tiède : 6

1.1.10. Eau chaude : 6

1.2. Généralités sur les eaux 6

1.2.1. L'eau de pluie 6

1.2.2. L'eau de mer ou d'océan 7

1.2.3. L'eau de surface 7

1.2.4. L'eau souterraine 7

Chapitre 2 : CADRE D'ETUDE, MATERIEL ET METHODES 8

2.1. Présentation de la zone d'étude 9

2.1.1. Contexte géographique et administratif 9

2.1.2. Climat 9

2.1.3. Pédologie 10

2.1.4. Végétation 11

2.1.5. Hydrographie 12

2.1.6. Hydrogéologie 13

2.1.7. Géologie 15
2.1.8. Géomorphologie 16
2.1.9. Population 18
2.2. Matériels et méthodes 19
2.2.1. Matériels 19
2.2.2. Méthodologie 19
Chapitre 3 : Résultats et discussion 22
3. Résultats 23
3.1. Projection des forages de la zone d'étude sur carte topographique 23
3.2. Représentation des traits de coupes sur carte topographique 24
3.3. Corrélations litho stratigraphiques et coupes hydrogéologiques 24
3.4. Identification des forages artésiens 28
3.5. Analyse topographique des aquifères artésiens 30
3.6. Analyse de la géologie sur les forages artésiens 31
3.7. Analyse des interactions entre les formations du sous-sol et les températures des eaux souterraines 32
4. Discussion 32
Conclusion 36
Références 37
Bibliographie 37
Webographie 39