



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0325/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0413001603

LABORATOIRE :
Sciences et Technologies
de l'Environnement
(LSTE)

Soutenu publiquement
le : 25/02/2021

MASTER

Physique Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**EVALUATION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE
FORAGES EN ZONE RURALE : CAS DU DEPARTEMENT
DE BOCANDA (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)**

Présenté par :

BAMBA BAKARY

JURY

**Président : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Directeur : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Encadreur : M. KOUAME Yao Francis, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Examineur : M. KOUYATE Amadou, Maître Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé**



UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2019-2020

N° D'ORDRE : 0325/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0413001603

MASTER

Physique Chimie Appliquée

Option : Environnement

THEME :

**EVALUATION DE LA QUALITE CHIMIQUE DES EAUX DE
FORAGES EN ZONE RURALE : CAS DU DEPARTEMENT
DE BOCANDA (Centre-Est de la Côte d'Ivoire)**

LABORATOIRE :
Sciences et Technologies
de l'Environnement (LSTE)

Présenté par :

BAMBA BAKARY

JURY

**Président : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Directeur : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Encadreur : M. KOUAME Yao Francis, Maître-Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé**

**Examineur : M. KOUYATE Amadou, Maître Assistant,
Université Jean Lorougnon Guédé**

Soutenu publiquement
le : 25/02/2021

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon très cher père BAMBA ADAMA qui a guidé mes premiers pas à l'école, qui fut tout au long de sa vie le soutien des siens, tu me manqueras toujours ; que la paix soit avec toi dans la maison de l'éternel.

Je dédie ce travail à ma mère KONE YOUEUTY en reconnaissance des efforts consentis et l'amour dont elle a longtemps fait preuve pour que j'en arrive là.

REMERCIEMENTS

Ce document porte le nom d'une personne mais, il n'aurait pas vu le jour s'il n'y avait pas eu la contribution de certaines personnes que nous tenons à remercier.

Nous tenons à remercier le personnel de l'Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa avec à sa tête le Professeur TIDOU Abiba Sanogo Epouse KONE, présidente de cette institution pour l'effort consenti tout au long de l'année et pour la réussite de cette année académique.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude au Professeur KOUASSI Kouakou Lazare, Directeur de l'UFR Environnement à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir accepté de présider le jury. Nous vous réitérons notre sincère reconnaissance pour nous avoir inculqué l'amour du travail et surtout du travail bien fait.

Nous voudrions adresser nos remerciements au Docteur KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé, pour avoir dirigé ce travail scientifique. Nous vous réitérons nos sincère reconnaissance pour votre disponibilité, votre engagement tout au long de ce travail de recherche.

Toutes nos reconnaissances et profondes gratitude au Docteur KOUAME Yao Francis, Maître-Assistant, Encadreur Scientifique de ce travail. Nous vous remercions Docteur pour votre disponibilité et vos critiques pertinentes. Merci infiniment pour votre inestimable soutien scientifique et moral, pour vos précieux conseils et pour votre sympathie ! Vous nous avez beaucoup appris. Merci pour tout ! Que vous prospériez à tous égards !

Nos reconnaissances vont également au Docteur KOUYATE Amadou, Maître Assistant, Examineur de ce travail. Nous lui adressons un sincère remerciement pour avoir accepté d'examiner et de contribuer à l'amélioration de ce travail.

Nous disons infiniment merci à notre ami Bayo Yatié, pour les nombreuses manifestations de soutiens moral, matériel et financier.

Nous voudrions adresser nos remerciements au Docteur ASSI Romuald. Cher Docteur, votre désir pour le travail bien fait, votre ponctualité et votre rigueur scientifique, sont entre autres des qualités enviées de tous. Merci pour votre soutien et d'avoir accepté de travailler avec moi pour la collecte de nos données.

Nous remercions, de tout cœur, nos amis du parcours GEE, dont la disponibilité a été utile pour notre parcours. Leur participation à la réalisation de nos travaux, leur accueil chaleureux, leur collaboration et leur ouverture nous ont permis de réaliser les tests et travaux dans la sérénité.

Nous dissons infiniment merci à nos amis et condisciples de la filière PC qui de loin ou de près ont contribué à l'élaboration de cette étude par leur solidarité et leur soutien moral.

Enfin, nos remerciements vont, à tous ceux qui directement ou indirectement ont contribué à notre formation et dont les noms ne sont cités. Ce travail, n'est en somme que la résultante des efforts des uns et des autres.

TABLE DES MATIÈRES

Pages

| | |
|---|------------|
| TABLE DES MATIÈRES | i |
| LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS | iii |
| LISTE DES TABLEAUX | iv |
| LISTE DES FIGURES | v |
| INTRODUCTION | 1 |
| PARTIE 1 : GENERALITES | 3 |
| 1. Cadre d'étude | 3 |
| 1.1 Présentation de la zone d'étude | 3 |
| 1.1.1 Situation géographique..... | 3 |
| 1.1.2 Climat | 4 |
| 1.1.3 Pluie..... | 4 |
| 1.1.4 Couvert végétal | 5 |
| 1.2 Forages..... | 5 |
| 1.2.1 Définition | 5 |
| 1.2.1.1 Forage | 5 |
| 1.2.1.2 Pompe à motricité humaine..... | 6 |
| 1.2.2 Avantages, inconvénients et coûts de forage. | 7 |
| 1.2.3 Etudes géophysiques | 8 |
| 1.2.4 Les étapes de réalisation d'un forage | 8 |
| 1.3 Eau | 10 |
| 1.3.1 Définition de l'eau..... | 10 |
| 1.3.2 Eaux naturelles | 11 |
| 1.3.2.1 Eaux de mers et eaux saumâtres | 11 |
| 1.3.2.2 Eaux de surface | 11 |
| 1.3.2.3 Eaux souterraines | 11 |
| 1.3.3 Différents types de nappes | 12 |
| 1.3.5 Directives de l'OMS | 13 |
| 1.4 Pollution des eaux..... | 14 |
| 1.4.1 Définition d'une eau polluée | 14 |
| 1.4.2 Pollution des eaux souterraines | 14 |
| 1.4.3 Paramètres de pollution organoleptique | 15 |
| 1.4.4 Paramètres de pollution chimique | 16 |

| | |
|---|-----------|
| PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES | 20 |
| 2.1 MATERIEL | 20 |
| 2.1.1 Fiches techniques | 20 |
| 2.1.2 Matériel de terrain et outils d'analyse de données | 20 |
| 2.1.3 Matériels d'échantillonnage et d'analyse chimique | 20 |
| 2.2 METHODES | 21 |
| 2.2.1 Choix des sites de prélèvement des échantillons | 21 |
| 2.2.2 Méthode d'échantillonnage | 23 |
| 2.2.3 Méthode d'analyse | 24 |
| 2.2.3.1 Analyse in-situ | 24 |
| 2.2.3.2 Analyse au laboratoire | 24 |
| 2.2.4 Méthode spectrophotométrie d'absorption moléculaire (SAM) | 24 |
| 2.2.5 Méthode Etalonnage de l'EDTA..... | 26 |
| 2.2.6 Méthode Préparation d'Analyse (PAN) | 26 |
| 2.2.7 Méthodes de traitement | 26 |
| 2.2.7.1 Traitement des données de terrain | 26 |
| 2.2.7.2 Traitement des données chimiques | 27 |
| PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION..... | 30 |
| 3.1 RÉSULTATS..... | 30 |
| 3.1.1 Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux de forages | 30 |
| 3.1.2 Qualité des eaux de forages..... | 35 |
| 3.1.2.1 Matrice de corrélation et l'Analyse en Composante Principale (ACP) | 35 |
| 3.1.2.2 Indice de qualité des eaux de forages | 38 |
| 3.2 DISCUSSION..... | 39 |
| CONCLUSION..... | 44 |
| REFERENCES | 46 |

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

| | |
|--------------|--|
| ACP | : Analyse en Composante Principale |
| CCME | : Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement |
| CICR | : Comité international de la Croix-Rouge |
| COD | : Taux de Carbone Organique Dissous |
| COT | : Carbone organique total |
| CREPA | : Centre Régional pour l'Eau Potable et l'Assainissement |
| DBO | : Demande Biochimique en Oxygène |
| DCO | : Demande Chimique en Oxygène |
| DNH | : Direction Nationale de l'hydraulique |
| GPS | : Global Positioning System |
| IQE | : Indice de Qualité des Eaux |
| MFT | : Marteau Fond de Trou |
| OMS | : Organisation Mondiale de la Santé |
| PAN | : Préparation d'Analyse |
| TH | : Titre Hydrotimétrique |
| UJLoG | : Université Jean Lorougnon Guédé |

LISTE DES TABLEAUX

| | Pages |
|---|--------------|
| Tableau I : Directives de l'OMS sur l'eau potable | 14 |
| Tableau II : Localités avec leur forage | 23 |
| Tableau III : Classes des indices de qualité | 29 |
| Tableau IV : Résultats des analyses chimiques des eaux de forages..... | 31 |
| Tableau V : Valeurs minimales et maximales des paramètres | 32 |
| Tableau VI : Matrice de corrélation..... | 36 |
| Tableau VII : IQE des quinze forages | 38 |

LISTE DES FIGURES

| | Pages |
|---|--------------|
| Figure 1 : Carte de la situation géographique du département de Bocanda..... | 3 |
| Figure 2 : Moyenne decimale pluvieometrique de Bocanda de 1960 à 2008 | 4 |
| Figure 3 : Forage en réalisation..... | 6 |
| Figure 4 : Pompe à motricité humaine | 7 |
| Figure 5 : Matériel d'échantillonnage et d'analyse..... | 21 |
| Figure 6 : Points de prélèvement à partir des forages | 22 |
| Figure 7 : Multi-paramètre WTW | 24 |
| Figure 8 : Carte factorielle F1 et F2 | 37 |
| Figure 9 : Indice de qualité en (%)..... | 39 |

INTRODUCTION

L'eau est une ressource essentielle aux besoins fondamentaux et tous les hommes doivent disposer d'un approvisionnement satisfaisant en eau (suffisant, sûr et accessible). Un meilleur accès à une eau de boisson saine peut se traduire par des bénéfices pour la santé. Tous les efforts doivent être consentis pour obtenir une eau de boisson aussi saine que possible (OMS, 2017).

De nombreuses régions du monde dépendent entièrement des ressources en eaux souterraines pour diverses utilisations. Les eaux souterraines contaminées par divers polluants qui les rendent impropres à la consommation peuvent mettre en péril la vie humaine et animale ainsi que l'environnement dans son ensemble (Raheli, 2016). En effet, les eaux souterraines captées peuvent contenir des éléments pouvant avoir des effets indésirables sur la santé, comme des microorganismes pathogènes, des substances indésirables ou même des substances toxiques (Yapo *et al.*, 2010 ; Jang *et al.*, 2012). Selon Ouandaogo (2008), l'expansion non contrôlée des grandes métropoles africaines, constitue de manière évidente une grave menace de pollution pour les eaux souterraines. L'absence d'infrastructures d'assainissement, présence des décharges, des latrines et fosses septiques non étanches et l'inadéquation du système d'évacuation des eaux pluviales et usées constituent un risque important de contamination des aquifères. Aussi l'alimentation des eaux souterraines procède par des infiltrations verticales des eaux de ruissèlement issues des précipitations, et des infiltrations des eaux de surface. Les risques de leur pollution chimique et biologique dépendent d'une part, des caractéristiques des eaux d'infiltration, et d'autre part, des propriétés naturelles des couches géologiques qui séparent la nappe phréatique de la surface du sol (Nola *et al.*, 2006).

En Côte d'Ivoire, malgré les efforts consentis par les autorités étatiques, les services d'eau potable enregistrent un taux de couverture nationale de 48 % en milieu rural et 70 % en milieu urbain. Des efforts doivent être faits en vue d'accroître ces taux (Koné *et al.*, 2009).

La Côte d'Ivoire a si bien compris les enjeux de l'accès à l'eau saine, qu'elle a mis en place le Programme National de l'Hydraulique Humaine (PNHH) dès 1973, visant à faciliter l'accès à un grand nombre de populations au service public d'eau. Malgré cet élan, les besoins en eau potable ne cessent de croître du fait à la fois des aléas climatiques, de la pollution et de l'accroissement rapide de la population (Ahoussi *et al.*, 2013). Des études réalisées en Côte d'Ivoire sur les ressources en eau par Coulibaly *et al.*, (2008) et Soro *et al.*, (2010), ont signalé d'une part l'existence de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux

souterraines que des eaux de surface, et d'autre part un risque de pollution des eaux due aux activités anthropiques.

Dans les localités du département de Bocanda, il existe plusieurs forages dont l'eau est destinée à la consommation. Les risques de pollution de ces ressources au niveau de ces localités proviennent en grande partie des activités agricoles. En effet, l'épandage des engrais de synthèse et des produits phytosanitaires (appelés également pesticides) et les rejets des bâtiments d'élevage sont à l'origine de nombreuses pollutions des sols (notamment par l'azote et les phosphates), qui vont à leur tour amener la contamination des cours d'eau par des eaux de ruissellement, et par la suite les eaux souterraines par une infiltration (Konan, 2019). Si l'eau provenant des forages est en générale de bonne qualité (CICR, 2012), celle provenant du département de Bocanda est-elle conforme aux directives de l'OMS (2017) en matière d'eau potable ? La réponse à cette préoccupation fait l'objet de cette étude.

De façon générale, cette étude se propose d'évaluer la potabilité chimique des eaux de forages de Bocanda.

De façon spécifique, il s'agira de :

- Répertorier puis cartographier les forages dans le département de Bocanda.
- Evaluer la qualité des eaux de forage du département.

Le travail s'articulera autour de trois grandes parties :

- La première partie est consacrée à l'étude bibliographique qui est composée d'une présentation de la zone d'étude, une généralité sur les forages et l'eau.
- La seconde partie intitulé matériels et méthodes, est essentiellement consacrée à la présentation des stations de prélèvement, les matériels utilisés pour mener à bien ce travail et la démarche pour évaluer la qualité des eaux de forage.
- La présentation et la discussion des résultats obtenus, ont fait l'objet de la dernière partie de ce manuscrit.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion et des recommandations.

PARTIE 1 : GENERALITES

1. Cadre d'étude

1.1 Présentation de la zone d'étude

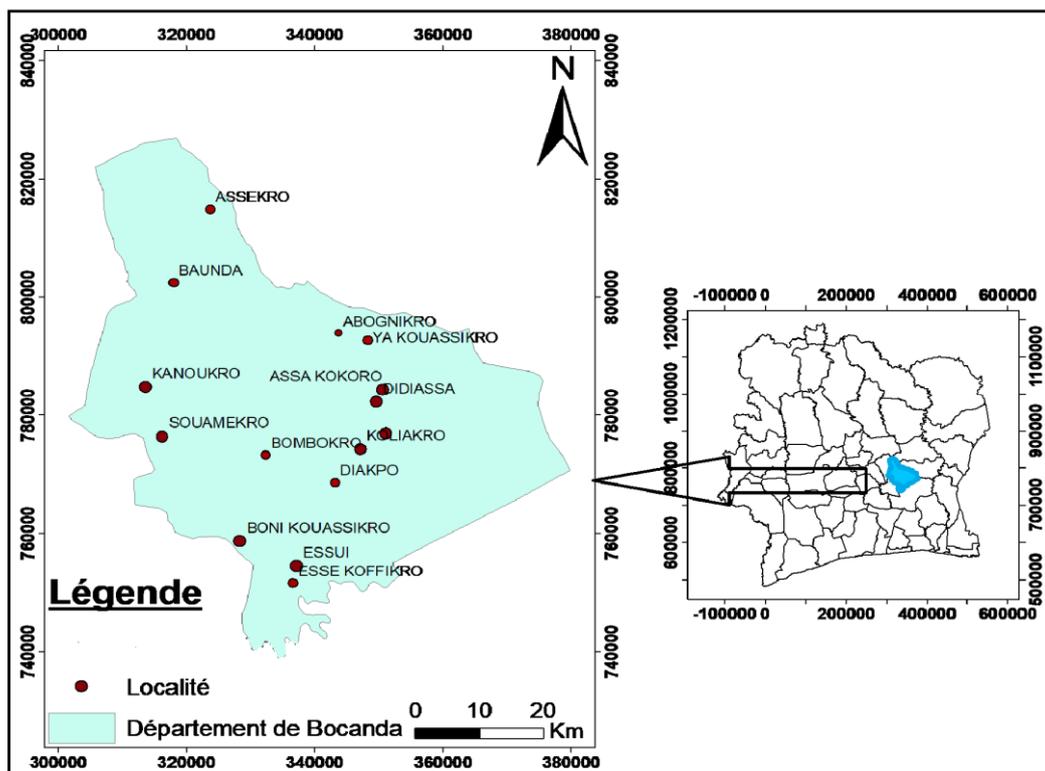


Figure 1 : Carte de la situation géographique du département de Bocanda

1.1.1 Situation géographique

Le département de Bocanda est situé au centre-est de la Côte d'Ivoire entre $7,063^{\circ}$ de latitude, $-4,499^{\circ}$ de longitude et 115 m d'altitude. Chef-lieu de la région du N'Zi-Comoé. Son peuple est essentiellement Baoulé (Benveniste, 1969). Sa population au dernier recensement de 2014 était de 247 578 habitants avec une superficie de 4200 km² (INS, 2014).

Le cours d'eau caractéristique du département est le N'Zi. Il prend sa source au nord de la Côte d'Ivoire et se jette dans le Bandama (Benveniste, 1969).

Les principaux affluents du N'Zi sont:

- le Kan situé à l'est ;
- l'Ourogo qui longe le village d'Ahouansou ;
- le Bongo qui jouxte le village de Booé-Akpokro.

1.1.2 Climat

Le régime pluviométrique du département de Bocanda est bimodal. Il y a une alternance de saisons pluvieuses et sèches. Au total, nous avons quatre (04) saisons dont deux sèches et deux pluvieuses. L'on observe toutefois, ces dernières années, des perturbations climatiques avec de grandes conséquences sur la production agricole (Benveniste, 1969).

1.1.3 Pluie

La pluviométrie de la région est très irrégulière variant entre un maximum de 1681,7 mm en 1968 à un minimum de 622 mm en 1997 avec une moyenne d'environ 1100 mm (voir figure 2). Il importe, en outre, de signaler que le début et la fin des saisons des pluies varient énormément d'une année à l'autre en fonction des localités. Ainsi compte tenu des quelques bouleversements du régime des pluies de ces dernières années, les pluies commencent quelquefois en mai au lieu d'avril. Cette variabilité des pluviométries perturbe le calendrier agricole des paysans (Gninrin *et al.*, 2017). La figure 2 nous donne l'évolution de la moyenne décimale de totaux pluviométriques de 1960 à 2008.

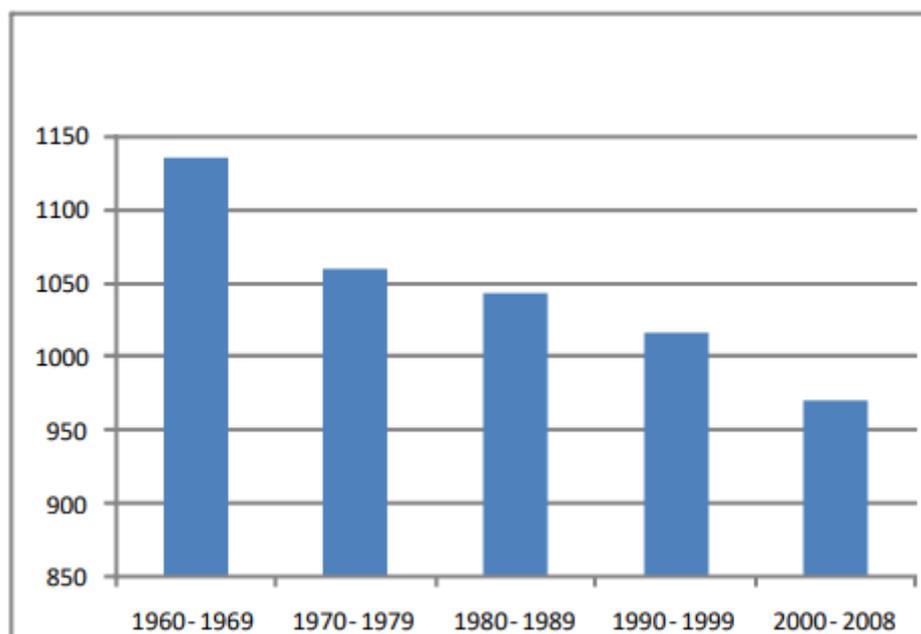


Figure 2 : Moyenne decimale pluviometrique de Bocanda de 1960 à 2008

Comme on peut le constater, le graphique montre une baisse des totaux pluviométriques tous les 10 ans. Ainsi les totaux sont passés de 1134,42 de 1960-1969 à 1059,39 mm de 1970 à 1979, à 1042,26 mm entre 1980 et 1989, à 1015,02 mm de 1990 à 1999 et enfin à 969,76 mm de 2000-2008. Au total, c'est une baisse de 164,66 mm de pluies qui a été enregistrée dans notre aire d'étude en espace de 49 ans.

1.1.4 Couvert végétal

Les exploitations forestières amplifiées par les activités agricoles ont largement bouleversé le couvert végétal dans notre espace d'étude. Selon les responsables des eaux et forêts section Bocanda, les chiffres de forêt primaire (30 406 ha) sont généralement des forêts classées (forêts classées d'Abéanou, de N'Do Kouassikro...). Ces derniers précisent par ailleurs que ces superficies sont à prendre avec réserve car la majorité de ces forêts classées ont été pénétrées par les paysans pour l'installation des champs de cultures. En somme, il convient de mentionner que le paysage de Bocanda est en ce moment dominé de friches et de forêts dégradées ou secondaires. Les végétations (forêts et savanes) ont connu une dégradation significative due principalement aux activités agricoles dominées par les cultures de café et de cacao (Gninrin *et al.*, 2017).

1.2 Forages

Lorsqu'on recherche une eau de meilleure qualité, il faut atteindre les nappes plus profondes. La construction d'un puits de grand diamètre serait alors très coûteuse. On réalise plutôt un trou de petit diamètre, qui sera suffisamment profond pour atteindre une nappe profonde. Il s'agit d'un forage, il est réalisé avec une machine spéciale, la sondeuse ou foreuse (DNH, 2004).

1.2.1 Définition

1.2.1.1 Forage

Le forage est un ensemble d'opérations qui permet de creuser un trou de diamètre centimétrique à décimétrique, généralement vertical et utilisé à des fins scientifiques ou économiques. Le forage d'eau est un ouvrage réalisé par des professionnels pour la mise en valeur des eaux profondes (DNH, 2004). On fore pour prospecter et/ou exploiter le sous-sol. Par exemple, des puits sont forés pour trouver et exploiter des ressources naturelles enfouies (eau, pétrole, ressources minières).



Figure 3 : Forage en réalisation

1.2.1.2 Pompe à motricité humaine

Création de points d'eau (forage) équipés de pompe (Equipement qui permet de tirer l'eau du puits ou du forage et de la relever vers la surface) à motricité humaine pour l'approvisionnement en eau des villages d'une population de plus de 100 habitants. Leur commande peut être à main (bras de levier, volant à tourner) ou à pied (pédal) (DNH, 2004).

Une pompe à motricité humaine comprend :

- Une partie immergée (le corps de pompe), avec des clapets et des pistons ;
- Une partie extérieure (la tête de pompe), avec châssis, bras de levier, volant ou pédale ;
- Ces deux parties sont reliées entre elles par des tuyaux

Lorsqu'ils sont correctement réalisés, les forages alimentent en eau potable et les services d'installation de pompe en font davantage pour prolonger la moyenne de durée de vie et améliorer la qualité de la vie dans les pays en voie de développement.



Figure 4 : Pompe à motricité humaine

1.2.2 Avantages, inconvénients et coûts de forage.

- **Avantages**

Le forage captant les aquifères profonds mieux protégé contre la pollution permet l'accès à l'eau de qualité et en quantité suffisante (pompe manuelle, système d'adduction d'eau, ...). Il garantit l'accès à l'eau potable même pendant les périodes sèches (DNH, 2004).

- **Inconvénients**

L'entretien des forages en milieu rural reste un inconvénient majeur pour assurer un accès continu à l'eau. Dans certains cas, les populations locales sont réticentes au goût de l'eau du forage (DNH, 2004).

- **Coûts**

Le coût du forage dépend d'un certain nombre de facteurs dont la profondeur de l'aquifère ou de la venue d'eau, la distance et l'accessibilité de la localité, la qualité du gravier servant de massif filtrant et la distance aux sources de ravitaillement (DNH, 2004).

Si le forage permet de capter l'eau en profondeur, la mise à disposition passe par l'installation des équipements (pompe manuelle, électrique (solaire, groupe électrogène)) dont les coûts et frais de maintenance assez variables restent un défi (DNH, 2004).

1.2.3 Etudes géophysiques

Chaque forage devrait être situé dans une zone qui se trouve à :

- Au moins 30 mètres de toute zone d'élimination de déchets humains (par exemple, fausse septique, latrines).
- Au moins 15 mètres des aires de dépôt d'aliment ou d'évacuation des eaux usées (exemple : cuisines et/ou zones d'évacuation des eaux de lessive).
- Au moins 30 mètres de toute zone d'alimentation d'animaux confinés, d'hébergement d'animaux ou de stockage de fumier.
- Au moins 150 mètres de toute décharge de déchets solides (décharge public) ou de déchets chimiques ou d'une zone d'élimination de déchet industriel. En outre, chaque forage devrait être situé dans la mesure du possible, en amont des zones précédemment citées (au point le plus élevé du terrain, ou, si la direction d'écoulement des eaux souterraines est connue, au point du toit de la nappe le plus élevé).
- Raisonnablement accessible aux bénéficiaires s'il est aussi le point de distribution d'eau pour les particuliers.
- Protégé de la pollution provenant des animaux en divagation.
- En dehors des plaines inondables et des zones sujettes aux inondations régulières causées par le ruissellement des eaux pluviales de surface (par exemple, s'il est établi en dehors d'une plaine inondable depuis 100 ans sans autres critères spécifiés ci-après), sauf si le forage a un joint de surface annulaire plus large que celui spécifié ici et que son tubage est prolongé au-dessus du niveau de crues connu comme étant le plus élevé,
- A proximité d'une source d'alimentation électrique si le forage doit être raccordé à une pompe électrique,
- Raisonnablement disponible pour l'entretien ultérieur du forage et protégée contre le vandalisme (Stephen, 2014).

1.2.4 Les étapes de réalisation d'un forage

- **travaux préparatifs**

Avant le forage, on prépare tout d'abord les matériaux nécessaires pour forer et équiper le point de forage repérer par la géophysique. Le GPS ou Global Positionning System sert surtout à se repérer, à se positionner dans l'espace les points de forages donnés par les

études géophysiques (Bejaona, 2017). Lors de la campagne de forage, les types des matériaux utilisés sont :

- le tube PVC lisse de 1,37 m de longueur et de 125 mm diamètre
- le tube PVC crépiné de 1.37 m de longueur et de 125 mm de diamètre
- le gravier filtrant de diamètre 3 à 4 mm
- le sable
- le ciment et le sable.

- **Foration**

Plusieurs techniques de forages d'eau ont été développées en fonction du type d'ouvrage recherché et du contexte géologique. Nous retiendrons ici 3 techniques courante de forage d'eau, le forage au battage, le forage Rotary et le forage percussion Marteau Fond de Trou (MFT).

Le forage au battage est la technique la plus ancienne, simple de conception, elle présentent un intérêt surtout dans les terrains sédimentaires grossiers (graviers, galets) qui sont d'excellents réservoirs.

Les techniques Rotary et Marteau fond de Trou sont les plus répandues et adaptées aux forages d'eau. Certaines machines Rotary sont de taille très importante et peuvent forer jusqu'à plusieurs centaines de mètres. La technique rotary est exclusivement utilisée dans les terrains sédimentaires y compris les terrains durs pour les machines de fortes puissances. La technique Marteau fond de Trou est utilisée dans les terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (grès, calcaires) (Bejaona, 2017).

- **Mesure de débit**

En forage à l'air, les venues d'eau sont dans la majorité des cas visibles et quantifiables. Toutefois, des venues d'eau peuvent être ignorées car colmatées par les cutting qui forment un cake sur les parois du forage. Il est facile d'estimer le débit en cours de forage, pour décider de son arrêt et de son équipement. Une mesure de débit est prise à chaque venue d'eau importante et sur un temps assez long. Toute l'eau sortie du forage est canalisée vers un exutoire équipé par un bout de tube de forage pour faciliter la mesure prise au seau. La venue d'eau doit être régulière et ne pas s'épuiser. Le débit mesuré est minimisé puisque les cutting colmatent

certaines zones d'alimentation et le forage n'est pas encore développé correctement (Bejaona, 2017).

- **Equipement du forage**

La mise en place de l'équipement, des tubes et du captage (crépine et gravier filtre) est une étape essentielle de la réalisation du forage d'eau. Le plan de captage et la position des crépines influera de façon très importante sur le débit d'exploitation de l'ouvrage. La nappe captée doit être isolée des pollutions superficielles pouvant s'infiltrer le long du tubage (rôle de l'aménagement de surface et du bouchon de ciment) (Bejaona, 2017).

- **Développement**

Le développement d'un forage est une étape très importante qui permet d'éliminer la plupart des particules fines du terrain et du gravier filtre qui pourraient pénétrer dans le forage ainsi que le reste du cake de boue et d'arranger le terrain autour de la crépine afin d'en augmenter la perméabilité. Cette opération permet d'augmenter de façon significative le débit du forage initialement estimé. La nappe est en effet progressivement mise en production, l'aquifère est libéré de ses fines, la perméabilité et le débit instantané augmentent (Bejaona, 2017).

1.3 Eau

1.3.1 Définition de l'eau

L'eau est une substance liquide, transparente, sans saveur ni odeur, réfractant la lumière et susceptible de dissoudre un grand nombre de corps. Elle est formée chimiquement de deux molécules d'hydrogène et une d'oxygène. Elle se trouve dans la nature à trois états : solide, liquide, gazeuse (Aouissi, 2018).

L'eau, sous sa forme liquide, est essentielle aux organismes vivants à la fois pour ses caractéristiques mécaniques et ses propriétés chimiques. D'un point de vue mécanique, la pression exercée par l'eau, appelée pression hydrostatique, est utilisée par les organismes pour se soutenir, que ce soit dans l'eau (méduse...) ou sur terre (végétaux). D'un point de vue chimique, l'eau dissout la majorité des corps solides et facilite ainsi les réactions chimiques, donc le métabolisme. L'eau est en effet un solvant essentiel, parfois qualifié de « solvant universel ». C'est d'ailleurs la présence permanente d'eau liquide qui permet de définir la zone

habitable circumstellaire où il est possible de découvrir une forme de vie extraterrestre comparable à celle que nous connaissons (Aouissi, 2018).

1.3.2 Eaux naturelles

1.3.2.1 Eaux de mers et eaux saumâtres

Les mers et les océans constituent des énormes réservoirs d'eau. Elles représentent près de 97.4% du volume d'eau existant actuellement sur notre planète. Le reste est la part des eaux continentales (eaux souterraine et superficielles). Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité. Elles sont dénommées aussi « eaux saumâtres », ce qui rend leur utilisation difficile. Notamment leur coût très élevé pour leur traitement (Aouissi, 2018).

1.3.2.2 Eaux de surface

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement (Aouissi, 2018).

1.3.2.3 Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol et se caractérise par une turbidité faible ou leurs eaux bénéficient de filtration naturelle importante. Comme elle se caractérise par une contamination bactérienne faible, car elle est habituellement à l'abri des sources de pollution. Par conséquent la dureté est souvent élevé, et les eaux souterraines peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents comme le calcium ou magnésium. En plus, dans les eaux souterraines, le fer et le magnésium présentent une concentration élevée (Degremont, 2005).

1.3.3 Différents types de nappes

- **Nappe captive**

Nappe d'eau souterraine qui circule entre deux couches de terrains imperméables. Elle est recouverte, totalement ou partiellement, par une couche de terrain imperméable. Ces nappes sont sous pression (OMS, 2017).

- **Nappe phréatique**

La nappe phréatique est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable. C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface (OMS, 2017).

- **Nappe alluviale**

Une nappe alluviale est un cas particulier de nappe libre (nappe peu profonde située sous un sol perméable). Les nappes alluviales sont des nappes qui circulent dans les sédiments des rivières, c'est une masse d'eau se trouvant dans des terrains alluvionnaires. Elles se trouvent à faible profondeur et sont donc relativement faciles d'accès pour des prélèvements d'eau (OMS, 2017).

- **Nappe karstique**

La nappe karstique se rencontre dans les formations calcaires. Les eaux en dissolvant le calcaire à la faveur des fissures préexistantes constituent des vides dans lesquels peuvent s'écouler les eaux. Ces vides peuvent atteindre de grandes dimensions (gouffres, cavernes). Dans ces conduits les eaux peuvent cheminer rapidement et constituer des cours d'eau souterrains. Aux points de sortie, les sources présentent des débits souvent variables dans le temps (leur valeur varie parfois de 1 à 100 au cours de l'année) (OMS, 2017).

1.3.4 Caractéristiques d'une eau potable

Une eau est dite potable quand elle satisfait à un certain nombre des caractéristiques (eau potable doit être limpide, incolore, fraîche (10° - 12° C), inodore et de saveur agréable, son pH est de 7. Elle ne peut contenir de substances toxiques minérales ou organiques et elle doit être exempte de germes pathogènes) (OMS, 2017). Cependant, une eau potable doit répondre à une série des critères :

- Fraîcheur et clarté ;
- Absence d'odeur et de couleur ;
- Goût agréable ;
- Suffisamment douce, aérée ;
- Minéralisation raisonnable ;
- absence de matières organiques et de germes pathogènes (CEAEQ, 2011).

1.3.5 Directives de l'OMS

Les Directives de l'OMS sont destinées à appuyer le développement et la mise en œuvre de stratégies de gestion des risques visant à garantir la salubrité des approvisionnements en eau de boisson à travers la maîtrise des teneurs en constituants dangereux de cette eau. Si l'OMS s'abstient de promouvoir l'adoption de normes internationales pour la qualité de l'eau de boisson, c'est principalement en raison des avantages procurés par l'application d'une démarche risques/bénéfices (qualitatifs ou quantitatifs) dans la définition des normes et des réglementations nationales. En outre, le meilleur moyen de mettre en œuvre les Directives est un cadre de gestion préventive visant à assurer la salubrité de l'eau, qui s'applique du captage au consommateur. Les institutions Ivoirienne en charge de l'eau suivent les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) relatives à la qualité de l'eau de boisson. Ainsi pour notre étude nous nous référons aux directives de l'OMS (2017) telles que données dans le Tableau suivant.

Tableau I : Directives de l'OMS sur l'eau potable

| Paramètres | Unité | Valeurs guides de l'OMS |
|---|-------|-------------------------|
| Température | T°C | 25° à 30° |
| pH | - | 6,5<Ph>8,5 |
| Turbidité | NTU | 1,0 |
| Conductivité | µS/cm | 500 à 1500 |
| Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) | mg/l | - |
| Magnésium (Mg ²⁺) | mg/l | 50 |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | 250 |
| Fer (Fe ²⁺) | mg/l | 0,3 |
| Manganèse (Mn ²⁺) | mg/l | 0,05 |
| Oxygène dissous | mg/l | - |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | 50 |
| Nitrites (NO ₂ ⁻) | mg/l | 3 |
| Ammonium (NH ₄ ⁺) | mg/l | 0,5 |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | mg/l | 250 |
| Phosphates (PO ₄ ³⁻) | mg/l | < 5 |
| Calcium (Ca ²⁺) | mg/l | 100 |

1.4 Pollution des eaux

1.4.1 Définition d'une eau polluée

La pollution de l'eau se définit comme étant toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse à l'utilisation. Cette pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines ainsi qu'aux phénomènes naturels. Elle a des effets multiples qui touchent aussi bien la santé publique que les organismes aquatiques, ainsi que la flore et la faune terrestre (Konan, 2019).

1.4.2 Pollution des eaux souterraines

Malgré ces avantages, on constate que les eaux souterraines sans doute parce que cachées sont ignorées par le grand public. En effet, lors des précipitations, l'eau ruisselle ou s'infiltré et se charge en composants des sols et des roches mères. Ainsi elle peut acquérir des sels minéraux

en grande quantité (Ca, Mg, Mn,...) et, d'autres éléments liés à l'activité de l'homme peuvent être entraînés (matières organiques, nitrates, pesticides, micro-organismes...). La nature et l'occupation du sol joue donc un rôle prépondérant. L'eau contient des substances ou des micro-organismes qui par leur nature et leur concentration peuvent être indispensables, acceptables, indésirables, voire toxiques ou dangereux (DNH, 2004).

1.4.3 Paramètres de pollution organoleptique

- **Couleur**

Idéalement, l'eau de boisson ne devrait pas avoir de coloration manifeste. La coloration de l'eau de boisson est habituellement due à la présence de matière organique colorée (principalement des acides humiques et fulviques) associée à la fraction humique du sol. La coloration est également fortement influencée par la présence de fer et d'autres métaux, qu'il s'agisse d'impuretés naturelles ou de produits de corrosion. Elle peut également résulter de la contamination de la source d'eau par des effluents industriels et peut être le premier indice d'une situation dangereuse. Une majorité de consommateurs peut détecter une coloration au-dessus de 15 (UCV) dans un verre d'eau et des niveaux de couleur inférieurs à 15 UCV sont souvent acceptables (OMS, 2017).

- **Turbidité**

La turbidité, généralement exprimée en unités de turbidité néphélométriques (UNT), décrit le trouble de l'eau provoqué par des particules en suspension (par exemple, l'argile et les limons), des précipités chimiques (par exemple, le manganèse et le fer), des particules organiques (par exemple, des débris de plantes) et des organismes. La turbidité peut être due à la mauvaise qualité de l'eau de source, à un mauvais traitement et, dans les réseaux de distribution, au remaniement de sédiments et de biofilms ou à l'intrusion d'eau souillée par des fissures dans le réseau et autres déficiences. L'augmentation de la turbidité réduit la clarté de l'eau et donc la transmission de la lumière. En-dessous de 4 UNT, la turbidité ne peut être détectée qu'en utilisant des instruments, mais à 4 UNT ou plus, une suspension laiteuse, boueuse, brun-rougeâtre ou noire est visible. Une turbidité visible réduit l'acceptabilité de l'eau de boisson. Bien que la plupart des particules qui contribuent à la turbidité n'aient pas d'impact sur la santé (même si elles peuvent être indicatrices de la présence de contaminants chimiques et microbiens dangereux), de nombreux consommateurs associent la turbidité à la sécurité sanitaire et considèrent qu'une eau trouble est impropre à la consommation (OMS, 2017).

- **Goûts et Odeurs**

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur « non désagréable ». La plupart des eaux, qu'elles soient traitées ou non, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère. Les odeurs sont causées par la présence dans l'eau de substances relativement volatiles. Ces substances peuvent être inorganiques comme le chlore, les hypochlorites, le dioxyde de soufre SO₂ ou le sulfure d'hydrogène H₂S ; ou organiques comme les esters, les alcools, les nitrites, les dérivés aromatiques et des composés plus ou moins bien identifiés résultant de la décomposition de matières animales ou végétales (comme les algues) ou encore dus à la pollution (Maiga, 2005).

1.4.4 Paramètres de pollution chimique

- **Potentiel d'hydrogène (pH)**

Bien que le pH n'ait pas habituellement un impact direct sur les consommateurs, c'est un des paramètres opérationnels les plus importants de la qualité de l'eau. Pour une désinfection efficace avec le chlore, le pH devrait être de préférence inférieur à 8 ; cependant, une eau de pH plus faible (approximativement pH 7 ou moins) sera vraisemblablement plus corrosive. Le pH de l'eau entrant dans le réseau de distribution doit être régulé pour minimiser la corrosion des conduites d'eau et des tuyaux dans les réseaux domestiques de distribution d'eau. La maîtrise de l'alcalinité et de la teneur en calcium contribue également à la stabilité de l'eau et détermine son agressivité envers les tuyaux et les accessoires. Des mesures insuffisantes pour minimiser la corrosion peuvent entraîner une contamination de l'eau de boisson et une altération de son goût et de son aspect. Le pH optimal requis variera suivant les approvisionnements en fonction de la composition de l'eau et de la nature des matériaux de construction utilisés dans le réseau de distribution, mais il sera habituellement compris entre 6.5 et 8.5. Des valeurs extrêmes de pH peuvent être dues à des déversements accidentels, des défaillances du traitement et des revêtements de conduites en mortier de ciment insuffisamment durcis ou appliqués quand l'alcalinité de l'eau est faible (OMS, 2017).

- **Température**

Pour l'eau potable, la température maximale acceptable est de 15°C, car on admet que l'eau doit être rafraîchissante. Quand les eaux naturelles sont au-dessus de 15°C, il y a risque de croissance accélérée de micro-organismes, d'algues, entraînant des goûts et des odeurs désagréables ainsi qu'une augmentation de couleur et de la turbidité. Les variations de température saisonnières peuvent affecter les eaux, surtout quand elles sont superficielles (OMS, 2017).

- **Conductivité électrique**

La conductivité électrique donne une indication sur la minéralisation globale de cette eau. Les molécules de sels se dissocient en paires d'ions lorsqu'elles entrent en solution dans l'eau.

Ces paires d'ions sont porteuses de charges électriques et, de ce fait, autorisent le passage du courant dans l'eau. Plus l'eau est minéralisée, plus il y a d'ions et, par conséquent, plus la conductivité sera élevée. Son unité est exprimée en ($\mu\text{s}/\text{cm}$) (CREPA, 2007).

- **Nitrates : (NO_3^-)**

Les nitrates (NO_3^-) représentent la forme azotée la plus présente dans les eaux naturelles. Ils proviennent de la minéralisation de la matière organique, des engrais azotés et des résidus d'animaux (Gaujous, 1995). Les décharges d'ordures, la mauvaise gestion des eaux usées, les latrines sont également des sources de production de nitrates (Ohou, 2010). Une eau dont la teneur en nitrates dépasse 50 mg/L n'est pas potable (OMS, 2017).

- **Nitrites : (NO_2^-)**

Les ions nitrites (NO_2^-) proviennent soit de l'oxydation incomplète des matières organiques, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiante (Rejseck, 2002). Ils ne représentent qu'un stade intermédiaire et sont facilement oxydés en ions nitrates. La présence des ions nitrites d'origine naturelle est très rare (Olivier, 2005). Une eau qui renferme des ions nitrites est à considérer comme suspecte car la présence de ces ions est souvent associée à une détérioration de la qualité microbiologique (Hawa, 2003). Un excès de nitrites dans les eaux de consommation peut provoquer dans certains cas une méthémoglobinémie pouvant aller parfois jusqu'à l'asphyxie chez les bébés nourris au biberon.

C'est pourquoi la quantité de nitrite dans l'eau de consommation ne doit pas dépasser 0.5 mg/l (OMS, 2017).

Sulfates : (SO_4^{2-})

Les sulfates sont naturellement présents dans de nombreux minéraux et sont commercialisés principalement pour l'industrie chimique. Leur présence dans l'eau provient de déchets industriels et de dépôts atmosphériques ; cependant, les niveaux les plus élevés sont habituellement observés dans les eaux souterraines et sont d'origine naturelle. En général, l'ingestion quotidienne moyenne de sulfates à partir de l'eau de boisson, de l'air et de la nourriture est d'environ 500 mg, la nourriture étant la source majeure. Cependant, dans les régions dans lesquelles l'eau de boisson contient des niveaux élevés de sulfates, l'eau de boisson peut constituer la source principale d'ingestion (OMS, 2017).

- **Ammonium : (NH_4^+)**

L'ammonium dans l'eau traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique. L'ammonium provient de la réaction de minéraux contenant du fer avec des nitrates. C'est donc un excellent indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel (Makhoukh *et al.*, 2011).

- **Chlorure : (Cl^-)**

Les teneurs en chlorures (Cl^-) des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Ainsi, les eaux courantes non polluées ont souvent une teneur en chlorures. Dans l'eau, le chlorure n'a ni odeur, ni couleur, mais peut procurer un goût salé (Makhoukh *et al.*, 2011).

- **Oxygène dissous**

Le terme oxygène dissous est communément employé pour "dioxygène dissous". Lorsque l'on parle de cette mesure on fait exclusivement référence à l'oxygène moléculaire (O_2).

Le dioxygène dissous est indispensable car il intervient dans la plupart des processus biologiques qui permettent la vie, sur terre comme en mer. La concentration en oxygène dissous dans l'eau résulte de paramètres physiques (température, salinité, mélange de la masse d'eau), chimiques et biologiques.

L'oxygène dissous est aussi fonction de l'origine de l'eau, les eaux superficielles en contiennent des quantités relativement importantes, contrairement aux eaux souterraines qui en contiennent

que quelques milligrammes. La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique (Derwich *et al.*, 2011).

- **Phosphore total**

Le phosphore total est l'ensemble du phosphore présent sous forme de phosphates ou de composés organophosphorés. Sa présence dans les eaux naturelles provient du lessivage de certains minéraux et de la décomposition de la matière organique. Le phosphore n'est pas dangereux pour l'homme en faible quantité et c'est surtout pour ralentir l'eutrophisation des systèmes aquatiques que la teneur en phosphore est mesurée (CEAEQ, 2011).

- **Fer**

Le fer (Fe) est un élément essentiel pour l'organisme humain. Cependant, les limites de potabilité sont basées sur les effets esthétiques, ménagers (tâches sur le linge, coloration des ustensiles de cuisine) et le seuil gustatif (Schafer *et al.*, 2009). Le fer peut se rencontrer dans l'eau sous différentes formes. Dans les conditions habituelles, c'est-à-dire pour un pH variant entre 4,5 et 9,5 le fer soluble présent est généralement à l'état ferreux (Fe^{2+}). Exposé à l'air et à tout autre oxydant, le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique (Fe^{3+}) insoluble sous forme de précipité rougeâtre qui est la rouille (Rodier, 2009).

- **Manganèse**

C'est un métal de couleur gris-blanc. Le fer et le manganèse sont souvent présents ensembles, à l'état naturel. Les sources les plus fréquentes de manganèse dans l'eau sont naturelles (exemple : altération des minéraux et des roches). Le manganèse provient de plusieurs sources artificielles et plus particulièrement des effluents industriels. La présence de manganèse en haute concentration dans l'eau potable peut générer chez le consommateur des désagréments tels que des colorations ou des goûts, odeurs désagréables et aussi la cirrhose du foie chez l'homme (Aranguren, 2008).

PARTIE 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

2.1.1 Fiches techniques

Les données chimiques utilisées pour l'élaboration de ce travail ont été fournies sur des fiches techniques. Ces fiches techniques comprennent trois grandes parties : la première partie donne des informations sur les forages (notamment le code du forage et le nom de la localité dans laquelle se trouve le forage), la deuxième partie présente les valeurs des paramètres chimiques et la dernière partie quant à elle présente les valeurs guides de l'OMS.

2.1.2 Matériel de terrain et outils d'analyse de données

Le matériel utilisé pour cette partie de l'étude est constitué essentiellement de :

- Matériel de terrain :

Un GPS pour relever les coordonnées géographiques des forages ;

Un appareil photo (Samsung) numérique de marque pour les prises de vue.

- Logiciels de traitement de données sont :

Microsoft Access pour l'enregistrement de données d'enquête ;

Tableau Excel 2013 pour le traitement des données d'enquête ;

Logiciel ARGIS 10.2.2. Pour la réalisation des différentes cartes ;

Logiciel Past (ver 2.09) pour la réalisation de l'Analyse en Composante Principale.

2.1.3 Matériels d'échantillonnage et d'analyse chimique

Le matériel utilisé pour les prélèvements des échantillons d'eau et l'analyse des paramètres chimiques est constitué des éléments suivants :

- La verrerie usuelle de laboratoire (tube à essai, erlenmeyer, pipette, béccher, flacons de 100 ml, 500 ml, fiole jaugée, pissette, pipette jaugée, pipette graduée, agitateur, balance, entonnoir, éprouvette graduée).
- Un multi-paramètre portatif WTW : pour effectuer les mesures in-situ de paramètres physico-chimiques tel que la température, la conductivité électrique, la teneur en oxygène dissous.
- Les flacons d'un litre (1L) plus une glacière pour les échantillons prélevés et leur conservation.

- Un spectrophotomètre DR6000 a été utilisé pour le dosage de tous les éléments chimiques importants dans l'eau à savoir : les ions nitrates, nitrites, ammonium, chlorures, calcium, magnésium et sulfates le phosphate et le fer et d'autres ions majeurs.



Figure 5 : Matériel d'échantillonnage et d'analyse

2.2 METHODES

2.2.1 Choix des sites de prélèvement des échantillons

Des points de prélèvements ont été choisis au niveau de quinze (15) localités. Pour chaque localité, un forage est identifié et retenu. Sur cette base, quinze (15) forages (numérotés de P1 à P15) ont été échantillonnés (Figure 7).

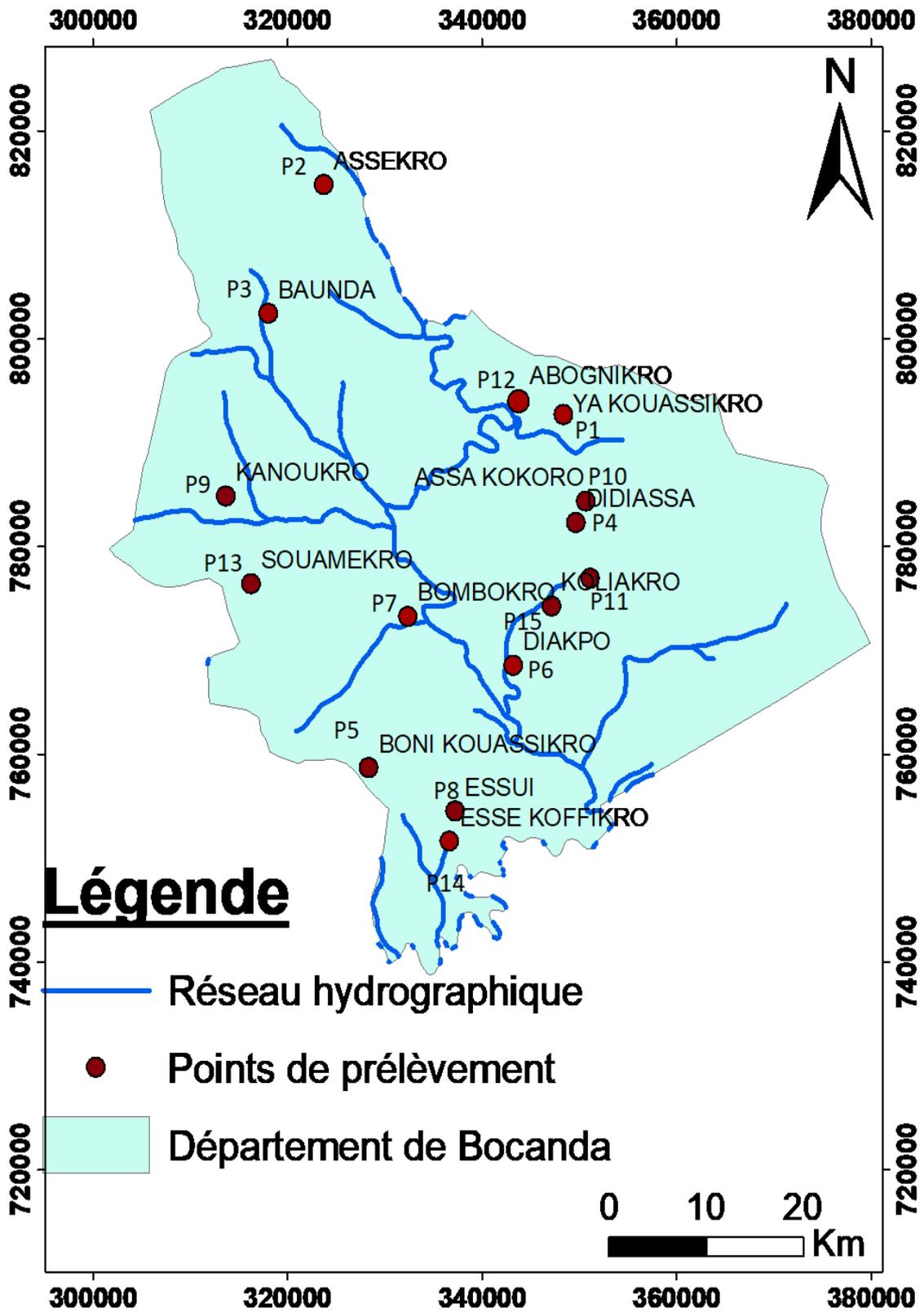


Figure 6 : Points de prélèvement à partir des forages

Tableau II : Localités avec leur forage

| Localités | Forages | Code du forages |
|------------------|----------------|------------------------|
| Ya.kouassikro | P1 | DM201 |
| Assekro | P2 | DM002 |
| Daunda | P3 | DM008 |
| Didiasa | P4 | DM009 |
| Boni.Kouassikro | P5 | DM210 |
| Diakpo | P6 | DM011 |
| Bombokro | P7 | DM212 |
| Essui | P8 | DM013 |
| Kanoukro | P9 | DM014 |
| Assa.Kokoro | P10 | DM015 |
| Koliakro | P11 | DM016 |
| Abognikro | P12 | DM017 |
| Kangonouan | P13 | DM018A |
| Souamekro | P14 | DM219 |
| Essé Koffikro | P15 | DM006 |

2.2.2 Méthode d'échantillonnage

Nous avons prélevé l'eau à chaque pompe villageoise (forage) pour leur analyse. L'eau est prélevée dans un seau sans agitation. Une fois prélevée, l'eau contenue dans le seau est introduit dans des bidons d'un litre (1l) préalablement étiquetés et rincés avec l'eau de la station de prélèvement. Le transport des échantillons depuis le point de prélèvement a été effectué dans une glacière contenant de la glace pour maintenir les températures à -4°C et être à l'abri de la lumière et de la poussière. Les échantillons ont été transportés au laboratoire pour l'analyse chimique.

2.2.3 Méthode d'analyse

2.2.3.1 Analyse in-situ

Les paramètres physiques tels que la température, et la conductivité ont été mesurés in situ à chaque point d'eau échantillonné. Pour ces différents paramètres, les appareils de mesure préalablement calibrés sont mis sous tension quelques minutes avant toute manipulation. Les sondes sont plongées ensuite dans l'échantillon d'eau prélevé et la sélection de la fonction du paramètre désiré donne la valeur de ce dernier sur l'écran d'affichage. Les échantillons d'eau sont collectés dans des flacons de 1 litre. Chaque flacon est rincé et rempli avec l'eau prélevée. Tous ces flacons sont conservés dans une glacière et acheminés au laboratoire, où ils sont stockés à une température de -4°C .



Figure 7 : Multi-paramètre WTW

2.2.3.2 Analyse au laboratoire

Les analyses au laboratoire ont porté sur la détermination des paramètres chimiques tels que les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-), les sulfates (SO_4^{2-}), l'ammonium (NH_4^+), les chlorures (Cl^-), le magnésium (Mg^{2+}), le fer (Fe^{2+}), les phosphates (PO_4^{3-}), le manganèse (Mn^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), et le bicarbonate (HCO_3^-).

2.2.4 Méthode de spectrophotométrie d'absorption moléculaire (SAM)

Cette méthode utilise en effet un spectrophotomètre qui détermine l'absorption d'une solution pour une longueur d'onde donnée ou pour une plage de longueurs d'ondes judicieusement choisies. L'appareil utilisé est le spectrophotomètre DR 6000. Cette technique a permis l'analyse d'une large gamme d'ions contenus dans les eaux, à savoir : les ions nitrates

(NO_3^-), les ions nitrites (NO_2^-), les ions ammonium (NH_4^+), les ions sulfates (SO_4^{2-}), les ions phosphates (PO_4^{3-}) et Chlorures (Cl_2).

- **NH_4^+** : L'ammonium a été dosé par colorimétrie au bleu d'indophénol (NF T 90.015). Le principe de ce dosage consiste à la formation en milieu alcalin ($10,4 < \text{pH} < 11,5$) d'un composé type indophénol par réaction des ions ammoniums avec du phénol et de l'hypochlorite, en présence de nitroprussiate comme catalyseur. La mesure spectrophotométrique est effectuée à la longueur d'onde 630 nm de la coloration obtenue. Le spectrophotomètre donne directement la teneur en ammonium de l'échantillon en mg/L (CEAEQ, 2011).
- **NO_3^-** : Les nitrates ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire avec l'acide sulfosalicylique (NF T 90.045). La méthode consiste à la mesure des nitrates avec l'acide sulfosalicylique formé par addition à l'échantillon de salicylate de sodium et d'acide sulfurique. Les lectures se font à la longueur d'onde de 415 nm. Le spectrophotomètre donne directement la teneur en nitrate de l'échantillon en mg/L (CEAEQ, 2011).
- **NO_2^-** : Les nitrites ont été dosés par spectrophotométrie d'absorption moléculaire par diazotation de l' amino-4-benzène sulfonamide en milieu acide et copulation avec le dichlorure de *N*- (naphtyl-1) diamino-1,2 éthane. Un complexe coloré susceptible d'un dosage spectrophotométrique est obtenu (NF T 90.013). Le spectrophotomètre donne directement la teneur en nitrite de l'échantillon en mg/L à une longueur d'onde de 520 nm (CEAEQ, 2011).
- **PO_4^{3-}** : Les ortho phosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue en milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, susceptible d'un dosage spectrophotométrique (CEAEQ, 2011)
- **SO_4^{2-}** : On remplit une cuvette de 25 ml avec l'échantillon. Après ajout du contenu d'un sachet de réactif sulfaVer 4, réactif en poudre au contenu du tube et après homogénéisation du prélèvement, une attente d'environ 5 minutes a été nécessaire pour l'apparition de la coloration blanche. Un témoin a été préparé de la même façon avec 10 ml d'eau déionisée. Des lectures ont été effectuées au spectromètre à la longueur d'onde de 450 nm en tenant compte de la valeur lue pour le témoin.
- **Cl**: Le chlorure présent dans l'échantillon réagit avec le thiocyanate mercurique pour former du chlorure mercurique et libérer l'ion thiocyanate. Les ions thiocyanate réagissent avec les ions ferriques pour former un complexe orange de thiocyanate

ferrique. La concentration de ce complexe est proportionnelle à la concentration de chlorure. Le chlorure à ces concentrations peut aussi être déterminé directement en utilisant l'électrode sélective chlorure (CEAEQ, 2011).

- **Fe²⁺** : Le réactif Ferrozine forme un complexe de couleur violette avec les traces de fer dans l'échantillon tamponné à pH 3,5. Cette méthode est applicable pour la détermination des traces de fer dans l'eau et peut être utilisée pour analyser les échantillons contenant de la magnétite (oxyde de fer) ou des ferrites. Ainsi, La teneur de Fe²⁺ sera déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre de longueur d'onde de 562 nm (Maiga, 2005).

2.2.5 Méthode Etalonnage de l'EDTA

Mg²⁺, Ca²⁺ : Le calcium et magnésium sont dosé avec une solution aqueuse d'EDTA à pH compris entre 12 et 13. Ce dosage se fait en présence de MUREXIDE. L'EDTA réagit d'abord avec les ions calcium libres, puis avec les ions calcium combiné avec l'indicateur coloré, qui va alors de la couleur rouge à la couleur violette (Chelli, 2013).

2.2.6 Méthode Préparation d'Analyse (PAN)

Mn²⁺ : La méthode PAN est une technique très rapide et extrêmement sensible pour la détection des traces de manganèse. L'acide ascorbique est d'abord utilisé pour réduire toutes les formes oxydées du manganèse en Mn²⁺. Un réactif cyanure-alcalin est ajouté pour masquer toutes les interférences potentielles. L'indicateur PAN est alors ajouté pour se combiner à Mn²⁺ et former un complexe de couleur orange. La teneur du manganèse sera déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre de longueur d'onde de 560 nm (Maiga, 2005).

2.2.7 Méthodes de traitement

2.2.7.1 Traitement des données de terrain

La gestion et l'analyse des données de terrain ont suivi plusieurs étapes afin de mieux renseigner les besoins de l'étude. Elle a consisté dans un premier temps à l'enregistrement et au stockage des données dans une base de données Access. Ensuite, le calcul des proportions de données collectées afin de déterminer le niveau de qualité des eaux de forages.

2.2.7.2 Traitement des données chimiques

- **Analyse descriptive**

Cette méthode consiste à analyser et interpréter les valeurs minimales et maximales des paramètres physico-chimiques en prenant pour référence les recommandations de l'OMS (2017).

- **Analyse en composantes principales**

L'ACP est un outil extrêmement puissant de synthèse de l'information, très utile lorsque l'on est en présence d'une quantité importante de données à traiter et à interpréter. Elle permet d'analyser des tableaux de données numériques quantitatives pour en réduire la dimensionnalité en trouvant un nouvel ensemble de variables plus petit que l'ensemble des variables, qui néanmoins contient la plupart de l'information. Les composantes principales sont obtenues par diagonalisation de la matrice des corrélations bi-variées. Cette diagonalisation définit un ensemble de valeurs propres dont l'observation pour chaque composante permet de déterminer le nombre de graphique à examiner (Mencio & Mas-pla, 2008). La phase finale de l'ACP consiste en une représentation graphique qui permet d'avoir un aperçu des résultats que les expressions numériques ne fournissent pas. L'ACP se réalise sur une population donnée.

Dans le cas de cette étude, les individus statistiques constituant cette population sont les différents paramètres chimiques des eaux de différents forages. Cette analyse a permis de connaître les corrélations existantes entre les différents paramètres chimiques pour ensuite ressortir les niveaux de minéralisations des eaux en provenance de chaque forage.

- **Indice de qualités des eaux**

L'IQE permet de déterminer le potentiel d'utilisation d'une eau en comparant sa qualité observée avec les critères de qualité exigés pour différents usages. Pour évaluer ce potentiel, il faut calculer pour une eau et une utilisation donnée un indice numérique (dont la valeur varie de 0 à 100) qui tient compte des valeurs de différents paramètres de l'eau et de leur importance relative vis-à-vis l'usage qui nous intéresse (CCME, 2001). L'indice est fondé sur la combinaison de trois facteurs qui sont :

- ✓ Le nombre de variables non conformes aux objectifs (**étendue F₁**) ;
- ✓ La fréquence à laquelle les objectifs ne sont respectés (**fréquence F₂**) ;

- ✓ L'écart entre les mesures non conformes et les objectifs correspondant
(amplitude F₃)

La formule mathématique servant à calculer comprend trois facteurs : l'étendue (F₁) ; la fréquence(F₂) et l'amplitude (F₃).

Le terme F1 (étendue) représente le pourcentage de variables dont au moins une mesure ne respecte pas l'objectif correspondant pendant la période d'étude (variables non conformes):

- ✓ L'étendue :
$$F_1 = \left(\frac{\text{nombre de parametre non conformes}}{\text{nombre total de parametre}} \right) \times 100$$

Le terme F2 (fréquence) représente le pourcentage de résultats analytiques non conformes aux objectifs (« résultats non conformes ») :

- ✓ La Fréquence :
$$F_2 = \left(\frac{\text{nombre de resultats non conformes}}{\text{nombre total de resultats}} \right) \times 100$$

Le terme F3 (amplitude) représente l'écart entre les résultats analytiques non conformes et les objectifs auxquels ils se rapportent. Ce terme est calculé en trois étapes.

- **Première étape**

L'amplitude par laquelle une concentration individuelle est supérieure à l'objectif (ou inférieure, lorsque cet objectif est un minimum) est nommé « coefficient d'écart ». Lorsque le résultat analytique ne doit pas dépasser l'objectif, le coefficient d'écart s'exprime comme suit :

$$\text{coefficient d'ecart}_i = \left(\frac{\text{valeur de resultats non conformes}}{\text{crtière}_i} \right) - 1$$

Dans les cas où le résultat analytique ne doit pas être inférieur à l'objectif, le coefficient d'écart se formule comme suit :

$$\text{coefficient d'ecart}_i = \left(\frac{\text{crtière}_i}{\text{valeur de resultats non conformes}} \right) - 1$$

- **Deuxième étape**

Le calcul du degré global de non-conformité se fait en additionnant les coefficients d'écart des résultats individuels puis diviser la somme obtenue par le nombre total de résultats individuels (conformes ou non aux objectifs). Cette variable s'appelle la somme normalisée des coefficients d'écart, ou *sncé*, et se représente comme suit :

$$\text{sncé} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{coefficient d'ecart}_i}{\text{nombre total de resultats}}$$

- **Troisième étape**

Le terme F_3 est ensuite calculé à l'aide d'une fonction asymptotique qui ramène la somme normalisée des coefficients d'écart par rapport aux objectifs ($sncé$) à l'intérieur d'une plage de valeurs de 0 à 100.

$$F_3 = \left(\frac{sncé}{0,01sncé + 0,01} \right)$$

Après avoir établis les formules des trois facteurs, la formule mathématique de l'indice de qualité des eaux (IQE) est donnée par la relation suivante :

$$IQE = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right)$$

Tableau III : Classes des indices de qualité.

| Classe de qualité | IQE | Signification |
|-------------------|--------|---|
| Excellente | 95-100 | Les concentrations sont conformes aux critères à peu près en tout temps |
| Bonne | 80-94 | Les concentrations s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables |
| Moyenne | 65-79 | Les concentrations s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables |
| Médiocre | 45-64 | Les concentrations s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables |
| Mauvaise | 0-44 | Les concentrations s'écartent généralement des niveaux souhaitables |

PARTIE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 RÉSULTATS

3.1.1 Caractérisation des paramètres physico-chimiques des eaux de forages

Les résultats d'analyse chimiques des eaux issues des différents forages du département de Bocanda sont présentés dans les tableaux IV et V.

Tableau IV : Résultats des analyses chimiques des eaux de forages

| | Forages | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | P11 | P12 | P13 | P14 | P15 |
| Paramètres | Valeurs | | | | | | | | | | | | | | |
| Physiques | | | | | | | | | | | | | | | |
| Température | 29,7 | 28,3 | 27,8 | 26,2 | 26,9 | 26,4 | 27,4 | 28,1 | 27,5 | 28 | 26,8 | 26,7 | 27,6 | 26,7 | 27,5 |
| pH | 6,81 | 7,06 | 6,15 | 6,38 | 6,67 | 6,57 | 6,38 | 6,39 | 6,45 | 7,12 | 7,52 | 6,75 | 6,57 | 7,11 | 6,54 |
| Turbidité (NTU) | 1,37 | 0,85 | 1,07 | 0,95 | 1,08 | 0,58 | 0,69 | 0,89 | 0,86 | 0,58 | 0,52 | 0,88 | 1,34 | 0,89 | 0,71 |
| Conductivité (µS/cm) | 187,3 | 404 | 404 | 485 | 191,6 | 300 | 238 | 246 | 262 | 277 | 359 | 384 | 294 | 519 | 437 |
| Chimiques | | | | | | | | | | | | | | | |
| bicarbonates (mg/l) | 213,5 | 176,9 | 73,2 | 134,2 | 244 | 244 | 219,6 | 146,4 | 115,9 | 237,9 | 292,8 | 103,7 | 286,7 | 158,6 | 158,6 |
| Magnésium (mg/l) | 7,29 | 8,748 | 10,206 | 11,664 | 13,608 | 16,038 | 16,038 | 11,178 | 13,122 | 8,262 | 14,56 | 6,318 | 10,206 | 12,636 | 7,776 |
| Chlorures (mg/l) | 17,73 | 7,092 | 21,276 | 10,638 | 10,638 | 14,184 | 49,644 | 7,092 | 24,822 | 21,276 | 10,638 | 7,092 | 10,638 | 17,73 | 14,184 |
| Fer (mg/l) | 0,16 | 0,01 | 0,46 | 0 | 0,38 | 0,01 | 0,01 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,17 | 0,12 | 0,55 | 0,02 | 0,28 |
| Manganèse (mg/l) | 0,045 | 0 | 0,1 | 0 | 0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,045 | 0,045 | 0,15 | 0 | 0,1 |
| Oxygène dissous (mg/l) | 6,5 | 6,7 | 6,5 | 6,8 | 6,5 | 6,8 | 6,8 | 6,8 | 6,7 | 6,6 | 6,6 | 6,7 | 6,4 | 6,8 | 6,6 |
| Nitrates (mg/l) | 1,5 | 0,2 | 0,9 | 0,9 | 0,6 | 1,7 | 0,9 | 0,4 | 0 | 2,3 | 1,2 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | 0,2 |
| Nitrites (mg/l) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ammonium (mg/l) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 0 |
| Sulfates (mg/l) | 6 | 6 | 1 | 1 | 6 | 6 | 8 | 3 | 1 | 10 | 10 | 1 | 10 | 3 | 2 |
| phosphates (mg/l) | 0,14 | 0,16 | 0,19 | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,21 | 0,12 | 0,14 | 0,12 | 0,18 | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,12 |
| Calcium (mg/l) | 18 | 31,262 | 8,016 | 10,421 | 45,691 | 36,072 | 17,635 | 13,627 | 35,27 | 29,659 | 51,302 | 12,024 | 64,128 | 24,849 | 14,429 |

Tableau V : Valeurs minimales et maximales des paramètres

| Paramètres | Unités | Minimum | Maximum | Valeurs guide de l'OMS (2017) |
|---|--------|---------|---------|-------------------------------|
| Température | T°C | 26,2 | 29,7 | 25° à 30° |
| pH | - | 6,15 | 7,52 | 6,5<Ph>8,5 |
| Turbidité | NTU | 0,52 | 1,37 | 1,0 |
| Conductivité | µs/cm | 187,3 | 519 | 500 à 1500 |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | 0 | 1,7 | 50 |
| Nitrites (NO ₂ ⁻) | mg/l | 0 | 0 | 3 |
| Sulfates (SO ₄ ²⁻) | mg/l | 1 | 10 | 250 |
| Ammonium(NH ₄ ⁺) | mg/l | 0 | 0,05 | 0,5 |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | 7,092 | 14,184 | 250 |
| Magnésium (Mg ²⁺) | mg/l | 6,318 | 16,038 | 50 |
| Fer (Fe ²⁺) | mg/L | 0 | 0,55 | 0,3 |
| Phosphates (PO ₄ ³⁻) | mg/l | 0,12 | 0,21 | < 5 |
| Manganèse (Mn ²⁺) | mg/l | 0 | 0,15 | 0,05 |
| Calcium (Ca ²⁺) | mg/l | 8,016 | 64,128 | 100 |
| Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) | mg/l | 73,2 | 292,8 | - |
| Oxygène dissous | mg/l | 6,4 | 6,8 | - |

Le Tableau IV ci-dessus représente les résultats des analyses chimiques des eaux de forages au niveau des localités du département de Bocanda et Le Tableau 5 présente les valeurs minimums et maximales des paramètres chimiques étudiées. L'évolution des paramètres chimiques varient d'un forage à un autre.

- Température

Dans notre zone d'étude, les valeurs de températures enregistrées sont situées dans la fourchette des normes de potabilité ($25^{\circ} \leq T^{\circ}\text{C} \leq 30^{\circ}$). Elles varient dans l'ordre de 26,2°C à 29,7°C.

- **pH**

Dans les zones étudiées, la grande majorité des échantillons respectent la limite prescrite par les directives de l’OMS ($6,5 < \text{pH} < 8,5$). Excepter les forages P3, P4, P7, P8 et P9 dont les valeurs oscillent entre 6,15 et 6,45. Cet écart est minime par rapport à la valeur guide de l’OMS.

- **Turbidité**

Les valeurs de turbidité varient entre 0,52 à 1,37 NTU. Sur les quinze échantillons analysés, quatre échantillons des forages P1, P3, P5 et P14 ont les valeurs supérieures à la norme indiquée par l’OMS (< 1 NTU) donc sont en désaccord avec les valeurs directives de l’OMS.

- **Conductivité**

Pour ce paramètre, la quasi-totalité des échantillons ne respectent pas la limite prescrite par l’OMS ($500 \mu\text{s}/\text{cm}$ à $1500 \mu\text{s}/\text{cm}$) avec des valeurs inférieures à $500 \mu\text{s}/\text{cm}$ sauf le forage P14 dont la conductivité présente une valeur conforme.

- **Fer**

Sa valeur dans les échantillons étudiés variait entre $0 \text{ mg}/\text{l}$ à $0,55 \text{ mg}/\text{l}$. Il y a 3 échantillons qui affichent des valeurs supérieures allant de $0,38 \text{ mg}/\text{l}$ à $0,55 \text{ mg}/\text{l}$. Ce qui est nettement supérieur à la valeur seuil recommandée par l’OMS ($0,3 \text{ mg}/\text{l}$) pour une eau de boisson. Les forages en question sont P3, P5 et P13.

- **Manganèse**

Les valeurs du manganèse dans les échantillons étudiés oscillent entre $0 \text{ mg}/\text{l}$ et $0,15 \text{ mg}/\text{l}$. Cependant, les forages P3, P5, P13 et P15 ont des valeurs hors norme ($0,05 \text{ mg}/\text{l}$) donc constituent un danger pour une eau de consommation.

- **Nitrates**

De façon générale, les concentrations en ions nitrate sont toutes inférieures aux directives de l’OMS ($50 \text{ mg}/\text{l}$) donc sont conformes selon la valeur guide de l’OMS avec une variation allant de $0 \text{ mg}/\text{l}$ à $1,7 \text{ mg}/\text{l}$.

- **Nitrites**

Pour ce paramètre, on observe aucune trace d’eux dans les échantillons d’eau analysés ($0 \text{ mg}/\text{l}$) donc l’ensemble des forages respectent les normes prescrites par l’OMS ($3 \text{ mg}/\text{l}$).

- **Sulfates**

Les teneurs des sulfates dans nos échantillons oscillent entre 1 mg/L et 10 mg/l et sont d'une manière générale acceptable pour la consommation humaine puisqu'ils n'accèdent pas les directives dictées par l'OMS fixée à 250 mg/l.

- **Calcium**

Les valeurs du calcium dans les échantillons étudiés oscillent entre 8,016 mg/l à 64,128 mg/L. toutes les valeurs respectent la limite prescrite par l'OMS (100 mg/l) donc acceptable pour une eau de consommation.

- **Ammonium**

Les teneurs en ion ammonium sont nulles pour la quasi-totalité des forages d'eau étudié à l'exception du forage P14 avec une concentration de 0,05 mg/l. Dans l'ensemble, tous ces forages affichent les valeurs de concentration inférieure aux valeurs dictées par l'OMS (3 mg/l).

- **Chlorures**

Les concentrations du chlorure dans les zones étudiées variaient entre 7,092 mg/l et 14,184 mg /l. Tous les points d'échantillonnage ont affiché des concentrations inférieures aux valeurs dictées par l'OMS (250 mg/l). Donc ils sont acceptables dans les eaux de boisson.

- **Oxygène dissout**

Les concentrations de l'oxygène dissout varient de 6,4 à 6,8 mg/L. Malheureusement pour cette édition (OMS 2011), la norme de l'oxygène dissout n'est pas définie. Mais il est l'un des éléments les plus répandus dans la nature et à partir d'une concentration de 100mg/l, il donne un goût désagréable à l'eau (Rodier 2009).

- **Bicarbonates**

Les résultats révèlent que les bicarbonates subissent une variation d'un forage à un autre. Dans l'ensemble, les concentrations vont de 73,2 mg/l à 292,8 mg/l. Une fois de plus, le bicarbonate est l'un des paramètres dont la norme n'est pas définie pour cette édition (OMS, 2011).

- **Phosphates**

De façon générale, les valeurs rencontrées dans les eaux souterraines des différentes stations sont faibles de l'ordre de 0,12 mg/l à 0,21 mg/l. Une fois déplus, le phosphate fait partir des paramètres dont la totalité des concentrations au niveau des forages respectent les directives de l'OMS.

- **Magnésium**

La teneur en Magnésium dans les échantillons étudiés variait entre 6,318 mg/l et 16,038 mg/L. Les valeurs sont en accord avec les valeurs guides de l'OMS (50 mg/l). Par conséquent elle ne représente pas un danger dans ces eaux.

3.1.2 Qualité des eaux de forages

3.1.2.1 Matrice de corrélation et l'Analyse en Composante Principale (ACP)

Les résultats respectives de la matrices de corrélation et de l'analyse en Composante principale obtenu sont représentés dans le tableau VI et sur la Figure 9.

Tableau VI : Matrice de corrélation

| | T°C | pH | Cond | HCO ₃ ⁻ | Mg ²⁺ | Cl ⁻ | Fe ²⁺ | Mn ²⁺ | Oxdss | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | NH ₄ ⁺ | PO ₄ ³⁻ | Ca ²⁺ |
|-------------------------------|----------|-----------|-----------|-------------------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| T°C | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 0,008971 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Cond | 0,13766 | 0,21226 | 1 | | | | | | | | | | | |
| HCO ₃ ⁻ | 0,013077 | 0,50279 | 0,88111 | 1 | | | | | | | | | | |
| Mg ²⁺ | -0,31043 | 0,33204 | 0,65375 | 0,7648 | 1 | | | | | | | | | |
| Cl ⁻ | 0,039251 | -0,17352 | -0,072107 | -0,11302 | -0,25446 | 1 | | | | | | | | |
| Fe ²⁺ | 0,12941 | -0,24043 | 0,15665 | 0,14215 | 0,24292 | 0,14974 | 1 | | | | | | | |
| Mn ²⁺ | 0,081622 | -0,18565 | 0,16966 | 0,18109 | 0,22052 | 0,28331 | 0,97112 | 1 | | | | | | |
| Oxdss | -0,41395 | -0,062277 | -0,30212 | -0,31279 | -0,24199 | -0,071186 | -0,86558 | -0,84647 | 1 | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | 0,11019 | 0,2561 | 0,38085 | 0,40899 | 0,009834 | -0,2141 | -0,19692 | -0,22902 | -0,068775 | 1 | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,18504 | 0,5297 | 0,87823 | 0,92433 | 0,64109 | -0,19962 | 0,11669 | 0,11351 | -0,34075 | 0,48485 | 1 | | | |
| NH ₄ ⁺ | -0,22912 | 0,31043 | -0,1028 | -0,11732 | 0,010659 | -0,063175 | -0,21104 | -0,21348 | 0,29927 | -0,21042 | -0,15397 | 1 | | |
| PO ₄ ³⁻ | -0,20617 | 0,12433 | 0,18354 | 0,088707 | 0,22305 | -0,23574 | 0,11438 | 0,088906 | 0,035176 | -0,13879 | 0,18491 | 0,45599 | 1 | |
| Ca ²⁺ | -0,12825 | 0,42456 | 0,64606 | 0,77278 | 0,95287 | -0,25411 | 0,35289 | 0,34125 | -0,43193 | -0,0125 | 0,68565 | -0,044037 | 0,16 | 1 |

Projection des paramètres chimiques et des différents forages sur la carte factorielle F1 et F2

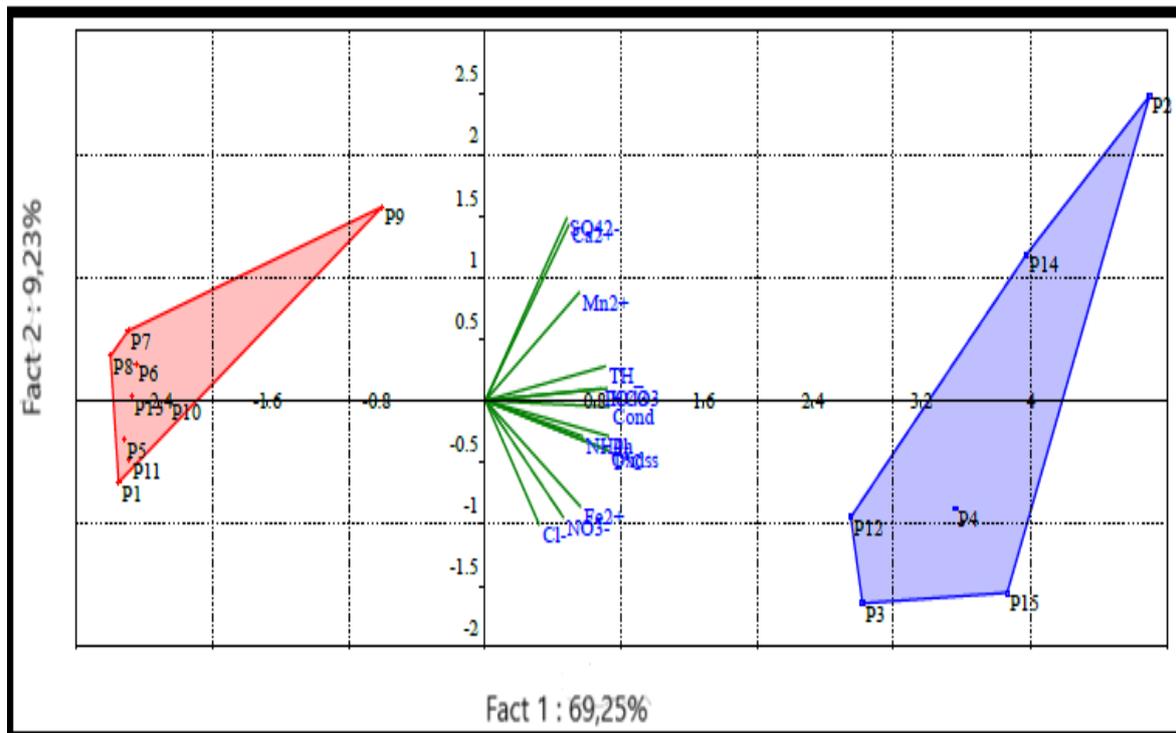


Figure 8 : Carte factorielle F1 et F2

L'ACP réalisée a donné comme résultat une carte factorielle de corrélation (Figure 9). Les composantes (Fact 1 et Fact 2) expliquent 79,03 % de la variation de l'ensemble des données. Le premier axe exprime 69,25% de la variance totale tandis que le deuxième exprime 9,23 %. La matrice de corrélation et l'ACP ont permis de regrouper ces forages d'eau en deux groupes. Le premier groupe est constitué de forages P1, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11 et P13. Ici, on observe une corrélation insignifiante entre les paramètres chimiques avec la conductivité car d'après notre observation, il n'y a aucune répartition des paramètres chimiques du côté des forages du premier groupe. Déplus, les valeurs de conductivité de ces forages varient de 187.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV). Contrairement aux forages du premier groupe, le deuxième groupe constitué de P2, P3, P4, P12, P14 et P15 indique une corrélation significative entre les paramètres chimiques avec la conductivité avec un angle inférieur à cent quatre-vingt degré entre les paramètres. On note aussi une conductivité variant de 384 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 519 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tableau IV) au niveau de ce groupe.

3.1.2.2 Indice de qualité des eaux de forages

Le tableau ci-dessous évoque les résultats des différents paramètres qui conduisent au calcul de l'IQE des forages et le résultat de celui-ci.

Tableau VII : IQE des quinze forages

| Localités | Forages | Paramètres | | | | | Classe de qualité |
|-----------------|---------|------------|-------|--------|-------|-------|-------------------|
| | | F1 | F2 | Sncé | F3 | IQE | |
| Ya kouassikro | P1 | 16,67 | 16,67 | 0,012 | 1,23 | 86,37 | Bonne |
| Assekro | P2 | 5,55 | 5,55 | -0,033 | -3,42 | 95,06 | Excellente |
| Daunda | P3 | 33,33 | 33,33 | 0,015 | 1,51 | 72,77 | Moyenne |
| Didiasa | P4 | 11,11 | 11,11 | 0,019 | 1,83 | 90,87 | Bonne |
| Boni.Kouassikro | P5 | 27,77 | 27,77 | 0,041 | 3,94 | 77,21 | Moyenne |
| Diakpo | P6 | 5,55 | 5,55 | -0,039 | -4,05 | 94,90 | Bonne |
| Bombokro | P7 | 11,11 | 11,11 | -0,051 | -5,33 | 90,42 | Bonne |
| Essui | P8 | 11,11 | 11,11 | -0,05 | -5,27 | 90,43 | Bonne |
| Kanoukro | P9 | 11,11 | 11,11 | -0,041 | -4,27 | 90,59 | Bonne |
| Assa.Kokoro | P10 | 5,55 | 5,55 | -0,04 | -4,18 | 90,61 | Bonne |
| Koliakro | P11 | 5,55 | 5,55 | -0,036 | -3,69 | 94,99 | Bonne |
| Konan.Elékro | P12 | 5,55 | 5,55 | -0,034 | -3,54 | 95,03 | Excellente |
| Kangonouan | P13 | 27,77 | 27,77 | 0,193 | 16,15 | 75,48 | Moyenne |
| Souamekro | P14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | Excellente |
| Essé Koffikro | P15 | 11,11 | 11,11 | 0,024 | 2,37 | 90,83 | Bonne |

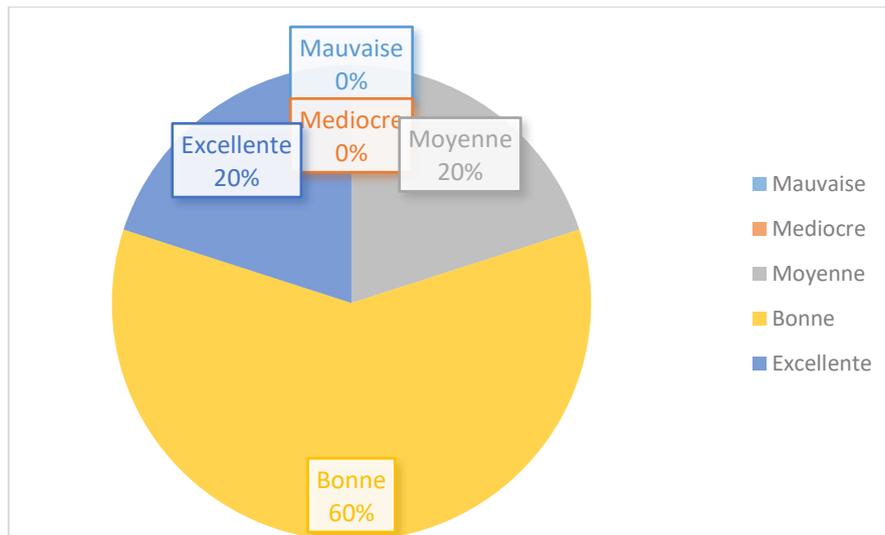


Figure 9 : Indice de qualité en (%)

Les résultats de l'IQE des forages du département de Bocanda sont consignés dans le Tableaux (VII) ci-dessous. Pour le calcul de l'IQE des forages du département, quatorze (11) variables telles que : le pH, le nitrates, le nitrite, le sulfates, l'ammonium, Chlorures, Magnésium, Fer, phosphates, Manganèse, le calcium, ont fait l'objet de notre étude. L'analyse du tableau (VII) indique que les IQE des quinze (15) forages (P1 à P15) varient de moyenne à excellent. Les forages que sont P3, P5 et P13 ont une eau de qualité moyenne soit 20 %. De plus, 60 % des forages étudiés sont d'une qualité bonne. Il s'agit des forages P1, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P11 et P15. En fin, les forages P2, P12 et P14 sont dotés d'une qualité excellente, soit 20 %. Cependant, on note 0 % en qualité mediocre et mauvaise.

3.2 DISCUSSION

Les populations rurales du département de Bocanda sont alimentées en eau potable à partir des eaux souterraines, en occurrence des eaux de forages. Cependant, quand n'est-il de leur qualité. La présente étude se propose d'évaluer la qualité des eaux de forages des localités de

département de Bocanda afin de faire la lumière sur la qualité des eaux de consommation en provenance de ces différents forages.

Les valeurs de températures relevées sont situées dans la fourchette des normes de potabilité ($25^{\circ} \leq T^{\circ}\text{C} \leq 30^{\circ}$). Elles varient dans l'ordre de $26,2^{\circ}\text{C}$ à $29,7^{\circ}\text{C}$. D'une façon générale, la température des eaux est influencée essentiellement par les variations climatiques (Dib, 2009) et par l'origine dont elles proviennent (superficielles ou profondes). En d'autres termes, les valeurs observées ici indiquent que ces deux facteurs (climats et origine des eaux) influencent peu la température à cause de la faible variation de température ($26,2^{\circ}\text{C}$ à $29,7^{\circ}\text{C}$). Cette faible variation de température s'expliquerait aussi par l'absence de contact eau atmosphère et du renouvellement perpétuel de l'eau (Tampo *et al.*, 2014). Cependant les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles (Rodier, 2009).

Le pH (potentiel d'Hydrogène) résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique. Les valeurs du pH varient de 6.15 à 7.52 au cours de cette étude. Le pH est l'un des variables avec des valeurs non conformes aux objectifs au niveau de certains forages. En effet, sur les quinze forages étudiés, cinq forages ont leur pH non conforme aux directives de OMS (2017) et les dix autres forages ont les valeurs de pH conformes aux valeurs guides de l'OMS (2017) (6,5 à 8,5) pour l'eau de consommation (Tableau V). Cependant, les valeurs de pH non conformes aux objectifs sont toutes légèrement acides. Les valeurs des ions bicarbonates dans les échantillons d'eau à pH acide oscillent entre 73,2 mg/l et 292,8 mg/l. L'acidité observé ($\text{pH} < 7$) pourrait s'expliquer par la présence de l'ion bicarbonate dans ces eaux car l'ion bicarbonate est un acide de formule chimique (HCO_3^-) (Moussa, 2017). Ce qui pourrait expliquer une corrélation moyenne de $r=0,50279$ entre ces deux paramètres. Cette acidité pourrait dépend aussi de l'origine de celle-ci et de la nature des terrains traversés (Saadali, 2007 ; Gouaidia, 2008). L'écart entre les valeurs de pH et les valeurs directives de OMS est minime et ne cause aucun danger pour la consommation de ces eaux.

Les forages P1, P3, P5 et P13 ont des valeurs de turbidités supérieures à la norme indiquée par l'OMS (2017) (< 1 NTU) donc en désaccord avec les normes de potabilité. Cette non conformité pourrait être due aux conduites anciennes et rouillées de ces forages (Moussa, 2017). Ce qui confère à l'eau de ces forages un aspect peu claire et une couleur indésirable. Par contre, les valeurs de turbidité constatée au niveau des forages d'eau P2, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P14 et P15 sont conformes aux valeurs directives de l' OMS (2017).

La qualité d'une eau souterraine est caractérisée par les concentrations en ions NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , PO_4^{3-} , Cl^- , Mn^{2+} , Mg^{2+} et Fer. La plupart de ces ions tel que NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , PO_4^{3-} et Cl^- affichent une concentration inférieure aux valeurs guides dictées par l'OMS. Les faibles teneurs de ces ions indiquent une faible pollution de leur part donc respectent les valeurs directives de l'OMS. Cependant, leur présence pourrait se justifier par un certain nombre de facteurs inhérents aux activités agro-pastorales autour des forages. En effet, responsable des pollutions affectant aujourd'hui de nombreuses ressources en eau, l'emploi d'engrais de synthèse et de produits phytosanitaires (appelés également pesticides) sont des forme de développement agricole pour des populations en milieu rural. La dégradation des ressources en eau par les transformations agricoles est de différents ordres. Tout d'abord, elle se traduit par une modification de l'écoulement des eaux. Les cultures annuelles, qui ont remplacé une grande partie des prairies, laissent le sol nu une grande partie de l'année. Les sols dénudés exposés aux pluies ont une moindre capacité d'infiltration que des sols couverts de végétaux, ils vont alors être plus fortement affectés par le ruissellement, l'eau qui s'écoule ainsi en surface rejoint rapidement les fossés et les rivières. Les eaux souterraines étant des émergences naturelles de nappes qui apparaissent d'une manière localisée ou diffuse à la surface du sol. Elles constituent donc des zones de vidange naturelle ou des exutoires ponctuels des eaux en provenance des eaux de ruissèlement issues des précipitations, et des infiltrations des eaux de surface (Konan, 2019).

Le nitrate est une molécule souvent incriminée. Cet élément contenu dans les engrais minéraux, dans les fumiers et les lisiers présente des risques pour la santé. Des études ont montré son caractère cancérigène (Konan, 2019).

Les pesticides, dénommés également produits phytosanitaires, contient des substances de natures chimiques très diverses dont la plupart sont utilisées en agriculture contre les parasites et les adventices de cultures. Ils présentent des conséquences graves sur la santé puisque de nombreuses molécules sont cancérigènes ou portent atteinte au système respiratoire, au système hormonal ou au système nerveux (Konan, 2019).

La dureté ou titre hydrotimétrique (TH) d'une eau correspond à la somme des concentrations en ions calcium et magnésium (Rodier 2009). Les teneurs relativement faibles en Calcium et Magnésium indiquent d'une part que les eaux de forages sont classées dans la catégorie des eaux douces (Tamungang *et al.*, 2016).

Le fer et le manganèse sont des variables dont certains de leur valeur sont non conformes aux valeurs directives de l'OMS. L'eau des forages concernée par la présence élevée en Fer sont les forages P3, P5 et P13. Le niveau de fer constaté pourrait provenir de l'état des forages en termes de conduites anciennes et rouillées et la géologie du sol. (Moussa, 2017).

Les teneurs respectives en manganèse au niveau des forages P3, P5, P13 et P15 sont de 0,1mg/l, 0,1mg/l, 0,15mg/l et 0,1mg/l contre celle de l'OMS qui est de 0,05mg/l. L'origine de cette pollution pourrait être due aux activités anthropiques et biogéniques (Ouattara, 2014).

La solubilité de l'oxygène dans l'eau est liée à plusieurs facteurs, en particulier la température, la pression atmosphérique et la salinité. La présence de ce paramètre est aussi fonction de l'origine de l'eau. Les eaux superficielles peuvent en contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation. Les eaux profondes n'en contiennent le plus souvent que quelques milligrammes par litre (Rodier *et al.*, 2009). Ce qui s'expliqueraient aussi par l'absence de contact eau atmosphère et du renouvellement perpétuel de l'eau (Tampo *et al.*, 2014).

L'analyse en composante principale réalisée a permis de classer l'eau des forages en deux groupes quant à leur niveau de minéralisation. En effet, La matrice de corrélation révèle une corrélation significative entre la conductivité et les ions en solution. Ces corrélations significatives reflètent l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation de l'eau souterraine de Bocanda (Ahoussi *et al.*, 2010). Aussi, la conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et la température (Dib, 2009). Le premier groupe est caractérisé par des eaux faiblement minéralisées. Les concentrations des sels minéraux sont faibles avec une conductivité comprise entre 187,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le deuxième groupe est caractérisée par des eaux de forages moyennement minéralisées avec une valeur de conductivité variant de 384 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 519 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Le calcul de l'IQE des quinze (15) forages à conduire à trois classes d'eau. La première classe est constituée des forages P3, P5 et P13 dotés de qualité d'eau moyenne. La valeur de l'IQE varie de 72,77 à 77,21. Pour cette tranche d'eau, la qualité de l'eau des forages P3, P5 et P13 est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée selon CCME (2001).

La deuxième classe de qualité d'eau bonne comprend les forages P1, P4, P6, P7, P8, P9, P10, P11 et P15. La valeur de l'IQE varie de 86,37 à 94,99. Ici, le pH est la valeurs s'écartant

légèrement des valeurs indicatives de l’OMS. Cette détérioration mineures observée de la part des paramètres montre que les activités anthropiques, l’état des forages et les eaux usées ne contaminent suffisamment les nappes pour influencer la qualité de ces ressources en eau car selon CCME (2001), la qualité de cette tranches d’eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineures est observées.

La troisième classe constituée des forages P2, P12 et P14 est d’une excellente qualité avec pour valeur de l’IQE variant de 95,03 à 100. Les paramètres au niveau du forages P14 sont tous en accord avec les valeurs directives de l’OMS. Cependant les valeurs de conductivité et du manganèse au niveau de certains forages sont en désaccord avec les valeurs prescrites par l’OMS. Toutefois, l’écart entre les valeurs de ces paramètres et les valeurs guides de l’OMS restent très faibles. Selon CCME (2001), la qualité de l’eau est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration est décelée et les conditions sont très proches des niveaux naturels ou originels.

Par ailleurs, on note d’autres sources de pollution des eaux souterraines. Selon (Ouandaogo, 2008), l’absence d’infrastructures d’assainissement (présence des décharges d’ordures, des latrines et fosses septiques non étanches) et l’inadéquation du système d’évacuation des eaux pluviales et usées font courir un risque important de contamination aux aquifères. Ce risque de pollution reste cependant faible en milieu rural.

CONCLUSION

Les eaux de forages sont encore pour des populations rurales du département de Bocanda, des sources importantes d'approvisionnement en eau potable. Ce présent travail a pour objectif d'évaluer l'indice de qualité des eaux de forages du département de Bocanda.

L'analyse des échantillons d'eau prélevés à partir des différents forages ont permis de dresser un portrait de la qualité chimique de ces eaux. Au regard des résultats d'analyse chimique, il ressort que la plupart des paramètres respectent les directives de l'OMS (2017). Excepté les paramètres que sont, le pH, la turbidité, la conductivité, le fer et le manganèse. Cependant l'écart entre les résultats de ces paramètres et les normes de l'OMS reste faible. Grâce à cette analyse, il est démontré les paramètres en accord avec les valeurs guides de l'OMS (2017) et ceux dont les concentrations visent la détérioration de la qualité d'eau de forages.

Les résultats de l'analyse statistique (matrice de corrélation et l'ACP) réalisés ont montré des corrélations non significatives, moyennes et très significatives entre la conductivité et les autres paramètres chimiques. Ces différents résultats de corrélation et l'ACP ont permis de classer l'eau des forages en deux groupes. Le premier groupe est caractérisé par des eaux faiblement minéralisées. Le deuxième groupe est caractérisée par des eaux de forages moyennement minéralisées. En outre, on peut croire que la minéralisation reste faible de façon générale pour l'ensemble des eaux de forages.

Le calcul de l'IQE des quinze (15) forages à conduire à trois classes d'eau. La première classe constituée de 20 % des forages soumis à notre étude est dotée de qualité d'eau moyenne. La deuxième classe de qualité d'eau bonne comprend 60 % des forages et la dernière classe constituée de 20 % des forages est d'une excellente qualité. Cependant cette variation de l'indice de qualité d'excellente à moyenne montre qu'il y-a une dégradation de l'eau au niveau de certains forages.

En vue de préserver, voire améliorer la qualité des eaux de forages, les autorités compétentes de Bocanda devront :

- sensibiliser les populations sur les risques liés aux manques hygiène et d'entretien des forages.
- prôner l'utilisation des engrais organiques au détriment des engrais chimiques.
- remplacer les conduites vieillissantes.

- Amener les populations au respect du périmètre de sécurité pour la protection de la qualité des eaux des forages contre les sources des pollutions comme l'élevage, l'agriculture...

REFERENCES

- Ahoussi K.E., Koffi Y.B., Kouassi A.M., Soro G. & Biemi J. (2013). Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). *Journal of Applied Biosciences*, 6(3) : 4703 – 4719.
- Aouissi L. (2018). Eau: Étude Physico-Chimique et Bactériologique Et Développement d'un Système de Traitement (membrane à Base de Charbon Actif), Mémoire de Master en Génie des Procédés des Matériaux, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université d'Algérie, 102 p.
- Aranguren M. (2008). Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de Doctorat en Science de la Terre et Environnement, Université Paul Sabatier (Toulouse, France), 489 p.
- Arjen V. (2010). Connaissances des méthodes de captage des eaux souterraines: Souterraines aux forages manuels, Un manuel d'instruction pour les équipes de forage manuel sur l'hydrogéologie appliquée, l'équipement et le développement des forages, Fondation PRACTICA, Oosteind. Deuxième éditions, (Marijke, Pays-Bas), 41 p.
- Baziz N. (2008). Etude sur la qualité de l'eau potable et risques potentiels sur la santé : cas de la ville de Batna. Mémoire de Master en Aménagement du territoire Option : dynamique des milieux physiques et risque naturels, Université COLONEL ELHADJ LAKHDAR BATNA, (Batna, Algérie), 34 p.
- Bejaona F.D. (2017). Caractérisations hydrogéologiques et hydrochimiques des eaux souterraines pour L'approvisionnement en eau potable des villages d'Antsakomileka et d'Ambarindranahary. Mémoire de Master en Géologie Minière, Mention Genie Geologique, Ecole Supérieure Polytechnique (Antananarivo, Madagascar), 90 p.
- Benveniste C. (1969), Etude régionale des circuits de transport dans la boucle de cacao, thèse de doctorat en science humaine, université de Paris (Paris, France), 257 p.
- CCME (2001). Indice de qualité des eaux du CCME 1.0 : Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : Indice de qualité des eaux du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME) 1.0, Manuel del'utilisateur, dans Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, Winnipeg, le Conseil, 6 p.

- CEAEQ (2011). Détermination du phosphore total dans les effluents : digestion à l'autoclave avec persulfate, méthode colorimétrique automatisée, MA 315 – P 2.0, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. 11 p.
- Chelli L. (2013). Analyses des eaux de réseau de la ville de Bejaïa et évaluation de leur pouvoir entartrant. Mémoire de Master en Génie des Procédés, Option : Génie Chimique, Université de Bejaïa. Bejaïa (Algérie), 102p.
- CICR (2012). Comité International de la Croix Rouge. Réalisation et réhabilitation de forages dans les conditions du terrain, *Revue technique*, 19 : 3-137.
- Coulibaly A., Mondé S., Wognin V.,A. & Aka K. (2008). State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, 19(2) :372-390.
- CREPA (2007). Manuel d'entretien et de suivi des réseaux d'égout à faible diamètre (REFAID), Edition EAA (Eau et Assainissement pour l'Afrique), Ouagadougou, 24p
- Degremont G. (2005). « Mémento technique de l'eau », 10ème éd, tom1 : Tec et doc, 131 p.
- DNH(2004). Guide Methodologie des projets d'alimentation en eau potable. Première édition. Mali, 184 p.
- Derwich L., Benziane Z. & Benaabidate L. (2011). Diagnostic of physicochemical and bacteriological quality of fez waste-waters rejected in Sebou River, Maroc. *Environmental Earth Sciences*, 63(4): 839-846.
- Desjardins R. (1997). Le traitement des eaux, édition de l'école polytechnique de Montréal, 2ème édition, Québec, Canada. 30 p.
- Dib I., (2009). L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine- Ain Yaghout (Est Algérien), Mémoire de master en hydraulique, construction hydro-technique et environnement, faculté des sciences de l'ingénieur, département d'hydraulique, Université Hadj Lakhdar, Batna, 127 p.
- Dupont A. (1981) Hydrologie-captage et traitement des eaux, HYDRAULIQUE, Tome 1, Ed 5, Paris, 484 p.
- Gaujous D. (1995). La pollution des milieux aquatique : Aide-mémoire 2ème édition Lavoisier TEC & DOC, 220 p.

- Gouaidia L. (2008). Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana nord-est Algérien, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, (Annaba, Algérie), 131 p.
- Gninrin Y.M., Zogbo Z.E., Yao N.P. & Djako A. (2017). CRISE agricole et mutations agricoles dans le département de Bocanda (centre-est-côte d'Ivoire), *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, 3 : 2521-2125.
- Hawa S. (2003). Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S. des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. Thèse de Doctorat d'Etat en Pharmacie, Université de Bamako, Mali, 77 p.
- INS (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat en Côte d'Ivoire. Données socio-démographiques des localités, résultats définitif par localités, Région du N'Zi. *Institut National de la Statistique*, vol III, tome 1, 1-26.
- Jang C.S., Chen J.S., Lin Y.B & Liu C.W. (2012). Characterizing hydrochemical properties of springs in Taiwan based on their geological origins, *Environ Monit Assess*, 184: 63-75.
- Kettab A. (1992). La ressource en eau en Algérie, stratégie, en jeux et vision, *Desalination, Laboratoire de Recherche des Sciences de l'Eau*, 136 : 25-33.
- Konan K.S. (2019). Cours de pollution des eaux, Université Jean Lorougnon Guédé (Daloa), 29 p.
- Koné Y.J.M., Abril G., Kouadio K.N., Delille B. & Borges A.V. (2009). Seasonal Variability of carbon dioxide in the rivers and lagoons of Ivory Coast (West Africa). *Est and Coasts*, 32 : 246-260.
- Little A.D. (1971). Inc water quality criteria data book. Inorganic chemical pollution of freshwater. Water pollut control. *Environmental protection agency*, 2 : 109-111.
- Maiga A.S. (2005). Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDM.sa dans la ville de Bamako : évaluation saisonnière. Thèse d'Etat en Pharmacie, Université de Bamako (Mali), 77 p.

- Makhoukh M., Sbaal M., Berrahou1 A. & Clooster M. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, 09 : 149-169.
- Mbawala A. & Ngassoum M.B. (2010). Evaluation de la pollution physicochimique et microbienne des eaux de puits de Dang-Ngaoundéré (Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 4(6): 1962-1975.
- Mencio A. & Mas-pla J. (2008). Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interaction in urbanized Mediterranean Streams. *Journal of Hydrology*, 352 (3-4) : 355–366.
- Moussa N.I. (2017). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des forages à usages particulier et semi industriels à Ouagadougou. Mémoire de master. Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, (Ouagadougou, Burkina Fasso), 90 p.
- Nola, M., Njine, N., Kemka, S. H., Togouet, P., Servais, M., Messouli, C. L., Boutin, A., Monkiedje, S. & Foto Menbohan. (2006). Transfert des bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en région équatoriale : influence de la charge en eau appliquée en surface. *Revue Des Sciences de L'eau/Journal of Water Science*, 19(2) : 101-112.
- Ohou Y. (2010). Impact des activités d'origine anthropique sur la qualité physique et chimique des eaux souterraines du bassin versant de la Lobo (Buyo, Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Abidjan, Côte d'Ivoire), 152 p.
- Olivier A. (2005). Chimie et pollution des eaux souterraines. Edition TEC et DOC, 390 p.
- OMS (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson. 4ème édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 539 p.
- Ouandaogo S. (2008). Ressource en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso qualité et vulnérabilité. Thèse de Doctora en hydrologie, Université d'Avignon (Ouagadougou, Burkina Faso), 254p.
- Ouattara F. (2014). Dynamique temporelle du fer et manganèse dans la retenue d'eau alimentant la ville de Korhogo et impact sur les intrants chimiques utilisés pour la production d'eau

- potable. Mémoire Master, UFR Sciences et Gestion de L'Environnement, Université Nangui Abrogoua (Abidjan, Côte d'Ivoire) 57 p.
- Raheli N.B., MORTAZAVI S., MOBINIFAR M., ADELI M. & Mater J. (2016). Caractérisation physico-chimique des eaux des forages des villages de Tanlili et Lilgomdé dans la région Nord du Burkina Faso - Corrélation entre les paramètres physico-chimiques. *Afrique Science*, 7(1) :259 – 271.
- Rejseck F. (2002). Analyse des eaux : aspect réglementaire et technique édition CRDP AQUITAINE. Collection biologique technique, 64 p.
- Rodier J. (2009). Analyse de l'eau : Eau naturelle, eau résiduaire, eau de mer. 9^{ème} édition, DUNOD, Paris (France), 1573 p.
- Saadali B., (2007). Etude de la qualité des eaux de sources issues du massif dunaire de Bouteldja (Algérie extrême Nord oriental), Mémoire de magister en géologie, Géosciences, faculté des sciences de la terre, département de géologie, Université Badji Mokhtar-Annaba, (Bouteldja, Algérie) 110 p.
- Sadek A. (2011). Hydrochimie et faciès géochimiques des eaux souterraines, Plaine de Bekaa. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2) : 334-348.
- Schafer A.L., Rossiter H.M.A., Owusu P.A., Richards B.S. & Awuah E. (2009). Physicochemical water quality in Ghana: Prospects for water supply technology implementation (Ghana). *Desalination*, 24(8) : 193-203.
- Soro N., Ouattara L., Dongo K., Kouadio K. E., Ahoussi K. E., Soro G., Oga Y.M., Savane I. & Biémi J. (2010). Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6) : 2203-2219.
- Stephen J.S. (2014). Guide d'installation de forage pour l'alimentation en eau destiné aux pays en voie de développement, 3^{ème} édition, Paris (France), 56 p.
- Tampo L., Ayah M., Kodom T., Tchakala I., Boguido P., Bawa L. & Djaneye B. (2014). Impact de la demande en chlore et de la chloration sur la désinfection des eaux de puits des quartiers de Lomé : cas des quartiers de Démakpoéet d'Agbalépédogan (Togo), *Journal of Applied Biosciences*, 7(1) : 6272– 6281.

- Tamungang N.E.B., Nchofua F.B., Mofor N.A. & Djoko Y.T. (2016). Contrôle de la qualité des eaux domestiques dans le village Babessi au Nord-Ouest Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 10(3) : 1382–1402.
- Yapo O.B., Mambo V., Seka A., Ohou M.J.A., Konan F., Gouzile V., Tidou A.S., Kouame K.V & Houenou P. (2010). Evaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire) : Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4(2) : 289-3

RESUME

Notre étude a pour objectif d'évaluer la qualité chimique des eaux de forage du département de Bocanda. Ainsi, des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de quinze forages afin de caractériser les paramètres chimiques. Les résultats d'analyse ont été comparés aux valeurs guides de l'OMS (2017) pour l'eau de consommation. La plupart des paramètres sont conformes aux valeurs guides de l'OMS (2017). Exceptés les paramètres que sont : le pH, la turbidité, la conductivité, le fer et le manganèse dont les valeurs au niveau de certains forages sont hors normes. Pour définir la potabilité de ces ressources en eau, deux méthodes d'analyse statistique (matrice de corrélation et ACP) et une méthode de calcul de l'IQE ont été appliquées. La matrice de corrélation et l'ACP ont permis de classer l'eau des forages en deux groupes quant à leur niveau de minéralisation. Le premier groupe est caractérisé par des eaux faiblement minéralisées et le deuxième groupe est caractérisé par des eaux de forages moyennement minéralisées. Le calcul de l'IQE des quinze forages a permis de classer l'eau en trois classes. 20 % des forages ont une qualité d'eau moyenne, 60 % des forages ont une bonne qualité d'eau et 20 % des forages sont dotés d'une excellente qualité.

Mots clés : qualité chimique, forage, analyse statistique, IQE.

ABSTRACT

Our study aims to assess the chemical quality of borehole water in the Bocanda department. Thus, water samples were taken from fifteen boreholes in order to characterize the chemical parameters. The analysis results were compared with the WHO guideline values (2017) for drinking water. Most of the parameters comply with WHO guideline values (2017). With the exception of the parameters: pH, turbidity, conductivity, iron and manganese, the values of which in certain boreholes are outside the norm. To define the potability of these water resources, two statistical analysis methods (correlation matrix and PCA) and a method for calculating the WQI were applied. The correlation matrix and PCA were used to classify borehole water into two groups in terms of their level of mineralization. The first group is characterized by weakly mineralized waters and the second group is characterized by moderately mineralized borehole waters. The calculation of the WQI of the fifteen boreholes allowed the water to be classified into three classes. 20 % of boreholes have average water quality, 60 % of boreholes have good water quality and 20 % of boreholes have excellent quality.

Keywords: chemical quality, drilling, statistical analysis, IQE.