



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:

2020-2021

N°D'ORDRE : 0413/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0414002533

MEMOIRE DE MASTER

En

Protection de l'Environnement et Gestion des Risques

THEME :

**EVALUATION DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE
DES EAUX DE FORAGES DANS DES VILLAGES DE
LA COMMUNE DE BONON (CENTRE-OUEST DE LA
COTE D'IVOIRE)**

LABORATOIRE :

BIODIVERSITE ET

ECOLOGIE

TROPICALE

Présenté par :

KOUASSI Benjamin Archinad

JURY

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

**Directeur : M. ALIKO N'Guessan Gustave, 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 06/10/2021



REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

UFR ENVIRONNEMENT

ANNEE ACADEMIQUE:

2020-2021

N°D'ORDRE :0413/2021

N° CARTE D'ETUDIANT :

CI0414002533

LABORATOIRE :

BIODIVERSITE ET

ECOLOGIE

TROPICALE

Soutenu publiquement :

Le 06/10/2021

MEMOIRE DE MASTER

En

Protection de l'Environnement et Gestion des Risques

THEME :

**EVALUATION DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE
DES EAUX DE FORAGES DANS DES VILLAGES DE
LA COMMUNE DE BONON (CENTRE-OUEST DE LA
COTE D'IVOIRE)**

Présenté par :

KOUASSI Benjamin Archinad

JURY

Président : M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences,

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Directeur : M. ALIKO N'guessan Gustave, Maître de Conférences

Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa

Encadreur : M. KOUAME Yao Francis, Maître-Assistant,

Université Jean Lorougnon Guédé

Examineur : KOUYATE Amadou, Maître-Assistant,

Université Jean Lorougnon Guédé

DEDICACE

Oh papa KOUAKOU N'Guessan et maman KOFFI Amenan ! Voici enfin l'accomplissement de votre rêve, celui de voir votre dernier fils atteindre le plus haut niveau de la connaissance. Malheureusement, vous êtes parti sans récolter ce que vous avez mis tant d'années à semer. Reposez-vous en paix.

REMERCIEMENTS

Au moment de terminer ce mémoire qui est le fruit d'une collaboration entre plusieurs personnes et directions, je voudrais donc saisir l'occasion pour exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont apporté leur soutien. Mon seul regret a été de ne pouvoir toutes les citer mais je voudrais les rassurer de toute ma profonde reconnaissance.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé, Mme. TIDOU Abiba Sanogo Epse KONE Professeur Titulaire, pour les travaux menés dans le sens du bon fonctionnement de cette Université.

Mes remerciements à M. KONE Tidiani, Professeur Titulaire et M. AKAFFOU Doffou Sélastique, Professeur Titulaire, respectivement Vice-président en charge de la pédagogie et Vice-président chargé des relations extérieures, pour les efforts fournis quotidiennement en vue de la bonne marche de l'Université Jean Lorougnon Guédé.

Je voudrais dire un grand merci à M. KOUASSI Kouakou Lazare, Professeur Titulaire, Directeur de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) Environnement, pour son engagement au bon fonctionnement de l'UFR.

Je voudrais adresser mes chaleureux remerciements à M. KOFFI Béné Jean-Claude, Professeur Titulaire, Responsable du Laboratoire de Biodiversité et Ecologie Tropicale (BioEcoTrop) à l'UFR Environnement pour son dynamisme et son acharnement au travail qui permet un cadre propice aux études.

Le témoignage de ma profonde gratitude à l'endroit de M. ALIKO N'Guessan Gustave, Maître de Conférences, Directeur scientifique de ce mémoire, pour sa contribution scientifique dans la rédaction de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma grande estime et mes vifs remerciements à mon encadreur M. KOUAME Yao Francis, Maître-Assistant pour sa disponibilité, ses orientations et le partage de ses expériences professionnelles respectives qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à M. KONAN Kouakou Séraphin, Maître de Conférences, pour sa contribution en tant que Président du jury et aussi à M. KOUYATE Amadou, Maître-Assistant d'avoir accepté d'examiner le travail.

Mes sincères remerciements à mon aîné et ami MELEDJE Akpa qui m'a orienté et aidé dans l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à remercier de tout cœur les étudiants de la 5ème promotion PEGR (Protection de l'Environnement et Gestion des Risques) en particulier à mon ami FADOUA Koffi Francis pour l'esprit de fraternité qu'il a créé et toujours animés dans le groupe.

Je tiens à remercier toute ma famille pour leurs soutiens et encouragement tout au long de mon cursus scolaire.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vi
INTRODUCTION.....	7
PREMIERE PARTIE: GENERALITES	1
I.1 Situation géographique et caractéristiques principales	3
I.1.1 Climat	4
I.1.2 Pluie.....	4
I.1.3 Végétation et sols	4
I.1.4 Population et activités	5
I.2 Eau	5
I.2.1 Définition de l'eau	5
I.2.2 Eaux souterraines	5
I.2.3 Directives de l’OMS	6
I.3 Pollution des eaux	7
I.3.1 Définition d’une eau polluée.....	7
I.3.2 Pollution des eaux souterraines.....	7
I.3 Forages	7
I.3.1 Définition	7
I.3.1.1 Forage.....	7
I.3.1.2 Pompe à motricité humaine.....	8
I.3.2 Avantages, inconvénients et coûts de forage	9
I.3.3 Paramètres de pollution organoleptique.....	10
I.3.4 Paramètres de pollution physico-chimique	11

I.4 Généralités sur l'indice de qualité.....	14
I.4.1 Définition de l'indice de qualité des eaux.....	14
I.4.2 Différentes catégories de la qualité de l'eau.....	15
I.4.3 Données du calcul de l'indice de qualité.....	15
DEUXIEME PARTIE II: MATERIEL ET METHODES	3
II.1 Matériel.....	22
II.1.1 Fiches techniques.....	22
II.1.2 Matériel de terrain et outils d'analyse de données.....	22
II.1.3 Matériels d'échantillonnage et d'analyse chimique	22
II.2 Méthodes.....	24
II.2.1 Choix des sites de prélèvement des échantillons	24
II.2.2 Méthode d'échantillonnage	25
II.2.3 Méthode d'analyse.....	26
II.2.3.1 Analyse in-situ	26
II.2.3.2 Analyse au laboratoire	26
II.2.4 Méthode spectrophotométrie d'absorption moléculaire (SAM).....	26
II.2.5 Méthode Etalonnage de l'EDTA	28
II.2.6 Méthode Préparation d'Analyse (PAN).....	28
II.2.7 Méthodes de traitement.....	28
II.2.7.1 Traitement des données de terrain	28
II.2.7.2 Traitement des données chimiques	29
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION.....	22
III.1 Résultats	32
III.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de forages.....	32
III.1.2 Analyse de la conformité des paramètres des forages.....	32
III.1.3 Analyse en Composante Principale (ACP).....	41

III.1.3.1 Valeurs propre	41
III.1.3.2 Analyse du plan factoriel F1-F2 et F1-F3	41
III.1.4 Indice de qualité de l'eau des forages.....	44
III.2 Discussion	46
CONCLUSION	51
REFERENCES.....	47
ANNEXE	49

LISTE DES ABREVIATIONS

- ACP** : Analyse en Composante Principale
- CCME** : Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement
- CEAEQ** : Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec
- CICR** : Comité International de la Croix-Rouge
- COD** : 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

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Directives de l'OMS sur l'eau potable (OMS 2017)	6
Tableau II : Classes des indices de qualité (CCME, 2001)	15
Tableau III : Localités avec les forages	25
Tableau IV : Valeurs minimales et maximales des paramètres	32
Tableau V : Valeurs propres et pourcentages de variance exprimée.	41
Tableau VI : Classe des potabilités des eaux de forages	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation de la commune de Bonon (INS, 2020).....	3
Figure 2 : Courbe ombrothermique de la commune de Bonon	4
Figure 3 : Forage en réalisation	8
Figure 4 : Pompe à motricité humaine	9
Figure 5 : Matériels de terrain	23
Figure 6 : Points de prélèvement des eaux de forage dans la commune de Bonon...	24
Figure 7 : Multi-paramètre WTW	26
Figure 8 : Variation de la température des eaux de forage des villages de Bonon ...	33
Figure 9 : Variation du pH des eaux de forage des villages de Bonon	33
Figure 10 : Variation de la conductivité des eaux de forage des villages de Bonon...	34
Figure 11 : Variation du nitrate des eaux de forage des villages de Bonon	34
Figure 12 : Variation du nitrite des eaux de forage des villages de Bonon.....	35
Figure 13 : Variation du sulfate des eaux de forage des villages de Bonon.....	35
Figure 14 : Variation de l'ammonium des eaux de forage des villages de Bonon.....	36
Figure 15 : Variation du chlore des eaux de forage des villages de Bonon	37
Figure 16 : Variation de la conductivité des eaux de forage des villages de Bonon...	37
Figure 17 : Variation du fer des eaux de forage des villages de Bonon.....	38
Figure 18 : Variation du manganèse des eaux de forage des villages de Bonon	39
Figure 19 : Variation du calcium des eaux de forage des villages de Bonon.....	39
Figure 20 : Variation du bicarbonate des eaux de forage des villages de Bonon.....	40
Figure 22 : Projection des variables dans les plans factoriels (F1-F2 et F1-F3).....	42
Figure 23 : Représentation graphique de la carte factorielle des forages.....	43
Figure 24 : Les valeurs de l'IQE des différents forages.....	44
Figure 25 : Pourcentage des forages selon la qualité de l'eau.....	46

INTRODUCTION

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable dans la vie des hommes, des animaux et des végétaux. L'avoir à disposition en quantité suffisante et en qualité contribue au maintien de la santé. Mais elle peut être aussi source de maladies du fait de sa pollution par des rejets industriels, des eaux usées, des déchets ménagers ou agricoles, des excréments et divers déchets organiques (Scalon *et al*, 2005). L'accès à l'eau potable a toujours été au centre des projets de développement car l'homme ne peut vivre sans cette ressource (Ballouki, 2012). Elle répond aux besoins fondamentaux de l'homme dans divers domaines tels que : l'agriculture, la production d'électricité, les industries ainsi que les usages domestiques. Pourtant l'accès à l'eau potable constitue l'un des problèmes auxquels sont confrontés les gouvernements de tous les Etats (Soro, 2002). Ainsi, l'approvisionnement en eau potable des populations en quantité suffisante en toutes saisons demeure l'un des soucis majeurs des différents gouvernements (Hawa, 2002). L'utilisation des eaux polluées à des fins alimentaires présente un danger pour la santé (Laferrrière *et al*, 1995). Environ quatre (04) millions d'enfants meurent chaque année de la diarrhée causée par les infections d'origine hydrique (FAO, 1996). Selon Raja *et al.* (2008), 75 % des maladies et 80 % de la mortalité infantile sont attribuées à la pollution des eaux. L'eau est devenue aujourd'hui un enjeu stratégique mondial dont la gestion doit impérativement s'intégrer dans une perspective politique de développement durable (Servais *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. Cette situation a contraint l'état de Côte d'Ivoire à opter pour une politique axée sur le renforcement des systèmes de production d'eau potable par la mise en place d'unités industrielles supplémentaires de production. Cependant, après vingt-cinq ans de fonctionnement du programme PNHH, les acquis de l'hydraulique urbaine connaissent une crise généralisée de l'approvisionnement en eau potable dans la plupart des villes de Côte d'Ivoire. Cette crise se traduit par la discontinuité du service d'eau potable, la dégradation de la qualité de l'eau distribuée et par la faible accessibilité d'une frange des ménages au réseau d'eau (Koukougnon, 2012). C'est dans ce contexte de dégradation de l'approvisionnement en eau

potable que se place cette étude. Parmi les sources en eaux exploitées, les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable car elles sont plus à l'abri des polluants que les eaux de surface (Guergazi *et al.*,2005). Dans les villages de la commune de Bonon, les eaux de forages restent les principales sources d'eau de consommation. La qualité naturelle de ces eaux souterraines peut être altérée par des activités anthropiques ou des phénomènes naturels. Ces eaux de forage sont confrontées à une dégradation permanente de leur qualité face aux activités anthropiques. Les populations de la commune de Bonon sont exposées à des risques sanitaires en consommant ces eaux de forages. 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). Au regard des pollutions qui pourraient dégrader notre environnement et avoir un impact négatif sur la qualité des eaux de forages, celle provenant de la commune de Bonon sont-elles conformes aux directives de l'OMS (2011) 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 qualité chimique des eaux de forages de Bonon. De façon spécifique, il a été question dans un premier temps de caractériser les paramètres physico-chimiques de l'eau de ces forages, dans un second temps de catégoriser la minéralisation de l'eau de ces forages et enfin de déterminer la qualité de l'eau de ces forages. 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, un rappel sur les forages, l'eau et de diverses pollutions qui affectent 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 l'indice de qualité des eaux.
- La présentation et la discussion des résultats obtenus, ont fait l'objet de la dernière partie de ce manuscrit.

PREMIERE
PARTIE:
GENERALITES

I.1 Situation géographique et caractéristiques principales

Bonon est une commune du centre-ouest de la Côte d'Ivoire, située entre 6°55'09" N et 6°02'49" W. La ville se trouve plus précisément sur l'axe Bouaflé-Daloa, appartenant au département de Bouaflé, dans la région de la Marahoué. Bonon est un chef-lieu de commune constituée de 10 (dix) quartier et villages à savoir : Bognonzra, Dabouzra, Madieta, Ouarebota, Blablata, Vrigrifouta, Séhizra, Zaguié, Brozra, Fréfrédou. En plus de ces dix quartier et village trois quartiers complètes les dix cités précédemment (Résidentiel, Dioulabougou et Belle-ville) Selon INS (2020). Elle a une superficie de 520 Km². Elle est imitée au nord- est par Bonon bi Zéhitafla, Gobazra, localités de la sous-préfecture. Plus au nord et au nord-Ouest, elle est bordée par le Parc National de la Marahoué, à l'ouest et au sudouest par les sous-préfectures de Gonaté et Zaguiéta. (Anonyme 1)

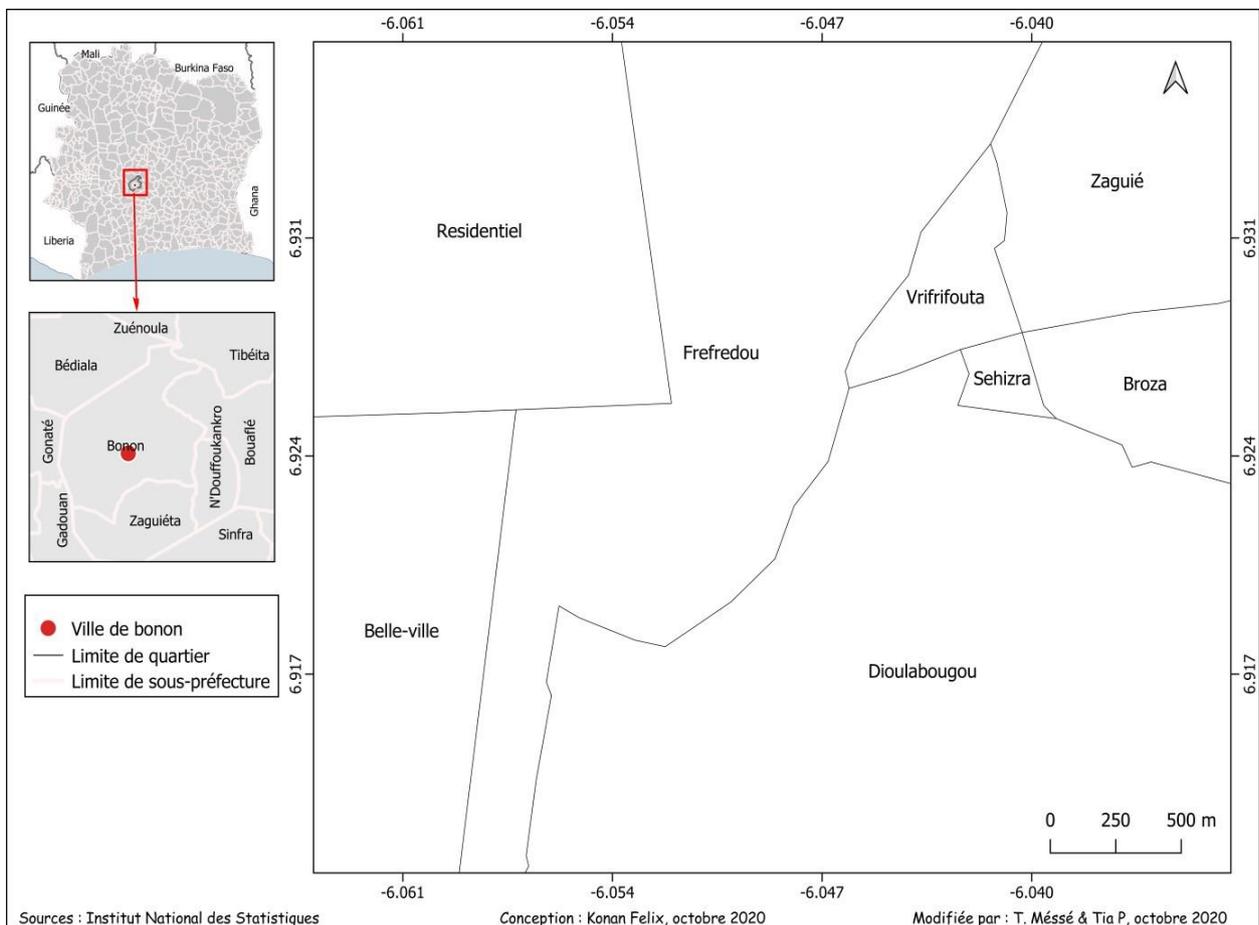


Figure1: Carte de localisation de la commune de Bonon (INS, 2020)

I.1.1 Climat

La zone de Bonon présente un climat tropical humide avec une saison sèche (de décembre à février), et deux saisons de pluies (de Mai à mi-juillet et d'Aout à Octobre), même si cet équilibre est quelque peu perturbé ces dernières années du fait du changement climatique. La température moyenne est de 26,8 °C. Quant à la pluviométrie annuelle, elle est de 1077,7 mm (Coulibaly, 2014).

I.1.2 Pluie

Les pluies moyennes mensuelles de Bonon sont reportées sur la Figure 2. Elles mettent en évidence la variabilité pluviométrique mensuelle dans cette région et celle de la température. L'analyse de cette figure permet d'identifier deux saisons bien distinctes : une saison des pluies allant de mars à novembre et marquée par trois maximales qui s'observe en mai, en juin et en septembre. Quant à la saison sèche, elle s'étend de décembre à février (Coulibaly, 2014).

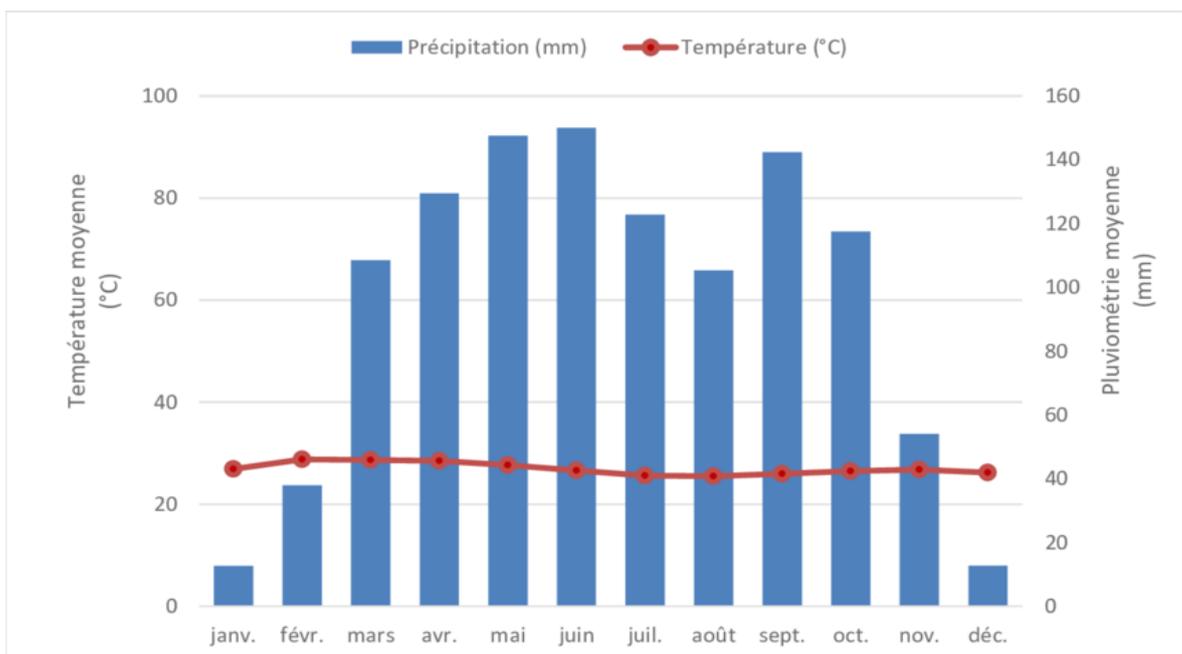


Figure 2 : Courbe ombrothermique de la commune de Bonon

I.1.3 Végétation et sols

La zone de Bonon est située dans le secteur de forêt mésophile juste au sud du contact forêt savane. Les sols sont pour la plus part ferrallitiques, moyennement dénaturés à dominance argilo-sableux. Elle se caractérise par un horizon humifère peu épais mais riche en matières organiques, faiblement acide et bien structurés (Kouakou *et al.*, 2018).

I.1.4 Population et activités

La population de la commune de Bonon est estimée 112 629 habitants dont 92 523 dans la ville de Bonon selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2014 (RGPH, 2014). Aujourd'hui avec un taux de croissance d'environ 2,6% par année, la population de la ville de Bonon peut être estimée à 106 957 habitants. La ville Bonon est animée essentiellement par l'activité agricole. Le binôme café- cacao et les cultures vivrières du riz, de la banane plantain, du maïs et de l'igname sont les plus pratiqués. Depuis quelques années, l'élevage de bovins prend de l'importance du fait des transformations paysagères qui l'autorisent désormais, il constitue un bon complément économique aux activités agricoles (Coulibaly *et al.*, 2019).

I.2 Eau

I.2.1 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. 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 ». (Aouissi, 2018).

I.2.2 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 élevée, 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).

I.2.3 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(2011) 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 normes de l’OMS (2017) telles que données dans le Tableau I suivant.

Tableau I : Directives de l’OMS sur l’eau potable (OMS 2017)

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

I.3 Pollution des eaux

I.3.1 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).

I.3.2 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, fer, Sulfates...) et, d'autres éléments liés à l'activité de l'homme peuvent être entraînés (matières organiques, nitrates, pesticides, microorganismes...). La nature et l'occupation du sol jouent 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).

I.3 Forages

Pour avoir 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).

I.3.1 Définition

I.3.1.1 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

I.3.1.2 Pompe à motricité humaine

Création de points d'eau (forage) équipés de pompe (équipement 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

I.3.2 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).

I.3.3 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, brunrougeâtre 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 ou non traitées, 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 bioxyde 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).

I.3.4 Paramètres de pollution physico-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 (Ω s/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

nitrate. 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).

- **Chlore : (Cl₂)**

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 (O₂). 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 l'eau 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 (Fe²⁺). Exposé à l'air et à

tout autre oxydant, le fer ferreux s'oxyde en fer ferrique (Fe^{3+}) insoluble sous forme de Généralités 13 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 ensemble 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).

I.4 Généralité sur l'indice de qualité

I.4.1 Définition de l'indice de qualité des eaux

L'indice de qualité des eaux est un outil pratique qui permet de faire la synthèse de données complexes sur la qualité de l'eau et de faciliter la présentation de ces données au grand public. L'indice de qualité des eaux du CCME est fondé sur une formule mise au point par le ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique et modifié par le ministère de l'Environnement de l'Alberta. L'indice comporte trois éléments :

- L'étendue : nombre de variables non conformes aux objectifs de qualité de l'eau.
- La fréquence : nombre de fois où ces objectifs ne sont pas respectés.
- L'amplitude : écart des mesures non conformes par rapport aux objectifs correspondants (CCME, 2001).

L'indice produit une valeur qui se situe entre 0 (qualité de l'eau la plus mauvaise) et 100 (qualité de l'eau la meilleure). Les variables, les objectifs et la période sur laquelle se fondent le calcul de l'indice ne sont pas précisés, pouvant varier d'une région à l'autre selon les conditions et les préoccupations locales. Il est recommandé d'utiliser au moins quatre variables échantillonnées au moins quatre fois pour déterminer les valeurs de l'indice. (CCME, 2001) Les variables et les objectifs choisis doivent également fournir des renseignements pertinents sur le site étudié. L'indice peut servir tant à l'évolution des conditions dans une zone donnée qu'à la comparaison de divers emplacements. Dans ce dernier cas, il faut s'assurer que les paramètres de comparaison sont valables. Des sites ne peuvent être comparés que si les mêmes variables et

les mêmes objectifs sont utilisés ; autrement, il faut comparer le degré de conformité des sites aux objectifs appropriés en fonction du classement des résultats par catégories (CCME, 2001).

I.4.2 Différentes catégories de la qualité de l'eau

La division de la plage de valeurs de l'IQE du CCME en catégories de qualité des eaux s'appelle « catégorisation » et constitue un processus essentiel, mais quelque peu subjectif. Une fois la valeur de l'IQE du CCME déterminée, on peut la classer (Tableau II) dans une des catégories de qualité de l'eau.

Tableau II : Classes des indices de qualité (CCME, 2001)

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	00-44	Les concentrations s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables

I.4.3 Données du calcul de l'indice de qualité

L'IQE du CCME fournit un cadre mathématique qui permet d'évaluer les conditions ambiantes de la qualité de l'eau en regard d'objectifs précis. Il offre une grande souplesse sur le plan du type et du nombre de variables à mesurer, de la période d'étude et du type de masse d'eau examinée (cours d'eau, tronçon, lac, etc.). L'établissement de ces paramètres est laissé à l'utilisateur. Avant de calculer l'indice, par conséquent, il faut définir le type de masse d'eau, la période visée, les variables mesurées et les objectifs appropriés.

On peut utiliser sans problèmes des stations individuelles, mais uniquement si l'on dispose d'une quantité suffisante de données pour chacune d'elles. Plus on combine de stations, plus les conclusions seront générales. On peut combiner les ensembles de données de différentes années, en particulier si ceux de certaines années sont incomplets, mais, comme c'est le cas lorsqu'on regroupe des stations, un certain degré de variabilité sera perdu. (CCME, 2001). Pour

que l'indice donne des résultats significatifs, il faut choisir des variables de qualité de l'eau appropriées à la région étudiée. Naturellement, le choix d'un petit nombre de variables pour lesquelles les objectifs ne sont pas respectés ne produira pas le même tableau que l'examen d'un grand nombre de variables dont seulement un certain nombre ne sont pas conformes aux objectifs. (CCME, 2001).

Conclusion partielle

Cette première partie avait pour but de présenter la zone d'étude ainsi que les généralités sur les paramètres physico-chimique de l'eau et l'indice de qualité de l'eau. En effet une eau est constituée de plusieurs paramètres dont les paramètres physiques, chimiques et organoleptique. L'indice de qualité quant à lui est un outil permettant d'évaluer la qualité d'une eau. La deuxième partie est consacrée à la présentation du matériel ainsi que les méthodes que nous avons utilisées dans le cadre de cette étude.

DEUXIEME
PARTIE II:
MATERIEL ET
METHODES

II.1 Matériel

II.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.

II.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 :**

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 Statistica pour la réalisation de l'Analyse en Composante Principale.

II.1.3 Matériels d'échantillonnage et d'analyse chimique

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

- La verrerie usuelle de laboratoire (tube à essai, erlenmeyer, pipette, bécher, 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 le pH, 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.



Les bidons



Une glacière



La verrerie



Un multi-Paramètre portatif



Un spectrophotomètre DR6000

Figure 5 : Matériels de terrain

II.2 Méthodes

II.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 6).

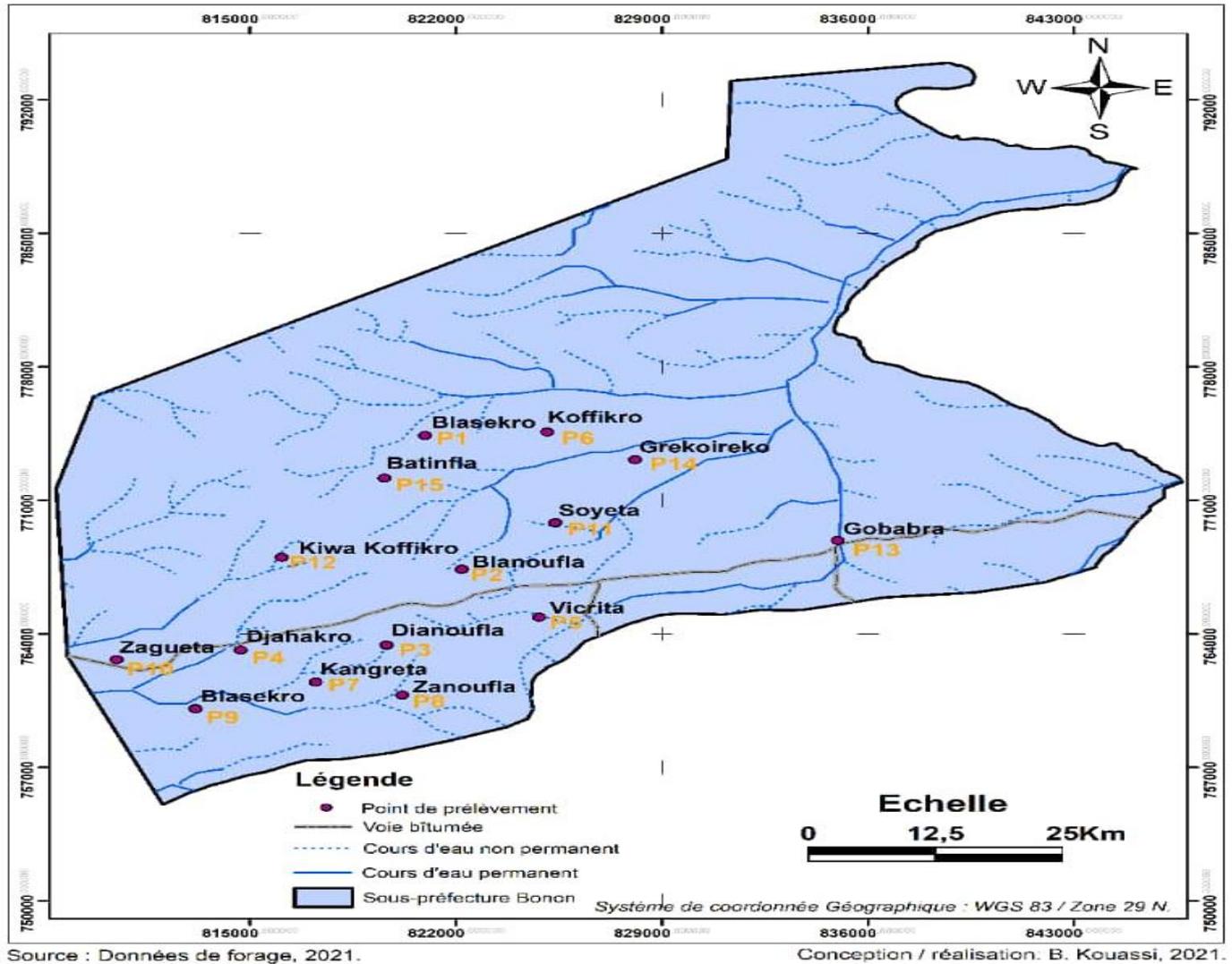


Figure 6 : Points de prélèvement des eaux de forage dans la commune de Bonon

Tableau III : Localités avec les forages

Localités	Forages	Code du forage
Blaisekro	P1	BF003
Blanoufla	P2	BF001A
Dianoufla	P3	BF005
Djahakro	P4	BF006
Vicrita	P5	BF010
Koffikro	P6	BF209
Kangreta	P7	BF009
Zanoufla	P8	BF013
Blaisekro	P9	BF214
Zaguieta	P10	BF012A
Soyeta	P11	BF212B
Kiwa Koffikro	P12	BF211-2
Gobazra	P13	BF207
Gregoirekro	P14	BF201B
Batinfla	P15	BF002

II.2.2 Méthode d'échantillonnage

L'eau a été prélevée à chaque pompe villageoise (forages) 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.

II.2.3 Méthode d'analyse

II.2.3.1 Analyse in-situ

Les paramètres physiques tels que la température, le pH, et la conductivité ont été mesuré in-situ au niveau de chaque point d'eau échantillonnée. Pour ces différents paramètres, les appareils de mesure préalablement calibrés sont mis sous tension quelques minutes avant toute manipulation. Les sondes sont ensuite plongées 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.



Figure 7 : Multi-paramètre WTW

II.2.3.2. Analyse au laboratoire

Les analyse au laboratoire ont porté sur la détermination des paramètres chimiques tel que le nitrate (NO_3^-), le nitrite (NO_2^-), le sulfate (SO_4^{2-}), l'ammonium (NH_4^+), le chlorure (Cl^-), Fer (Fe^{2+}), phosphates (PO_4^{3-}), Manganèse (Mn^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), et le bicarbonate (HCO_3^-).

II.2.4 Méthode 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 choisie. 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^-).

Mesure 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).

Mesure 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).

Mesure 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).

Mesure PO_4^{3-} : Les 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)

Mesure 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.

Mesure 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).

Mesure Fe^{2+} : 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 Fe^{2+} sera déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre de longueur d'onde de 562 nm (Maiga, 2005).

II.2.5 Méthode Etalonnage de l'EDTA

Mesure Ca^{2+} : Le calcium et magnésium sont dosés 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).

Mesure Titre Hydrométrique (TH) ou Dureté Totale : La détermination du TH consiste à doser essentiellement les ions calcium et magnésium contenus dans l'eau. Au cours de ce dosage, le réactif titrant utilisé est l'anion éthylène diamine tétracétate abrégé EDTA, le milieu étant tamponné à pH=10.

II.2.6 Méthode Préparation d'Analyse (PAN)

Mesure Mn^{2+} : 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 Mn^{2+} . Un réactif cyanure-alkalin est ajouté pour masquer toutes les interférences potentielles. L'indicateur PAN est alors ajouté pour se combiner à Mn^{2+} 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).

II.2.7 Méthodes de traitement

II.2.7.1 Traitement des données de terrain

Il a consisté dans un premier temps à l'enregistrement et au stockage des données dans une base de données Access. Dans un seconde temps, de calculer des proportions de données collectées afin de déterminer le niveau de qualité des eaux de forages.

II.2.7.2 Traitement des données chimiques

- **Analyse descriptive**

Cette méthode consiste à analyser et interpréter les valeurs minimales et maximales des paramètres chimiques en prenant pour référence les recommandations de l’OMS.

- **analyse en composante principale**

L’ACP est un outil 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 de forage donnée son l’indice de qualité (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 de calcul 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):

$$F1 = \left(\frac{\text{nombre de parametres non conformes}}{\text{nombre total de parametres}} \right) \times 100 \quad (1)$$

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

$$F2 = \left(\frac{\text{nombre de resultats non conformes}}{\text{nombre total de resultats}} \right) \times 100 \quad (2)$$

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 :

$$\text{Coefficient d'écart } i = \left(\frac{\text{valeur de resultats non conformes}}{\text{crtère } i} \right) - 1 \quad (3)$$

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

$$\text{Coefficient d'écart } i = \left(\frac{\text{crtère } i}{\text{valeur de resultats non conformes}} \right) - 1 \quad (4)$$

- **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 présente comme suit :

$$\text{Sncé} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{coefficient d'ecart } i}{\text{nombre total de resultats}} \quad (5)$$

- **Troisième étape**

Le terme F3 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 (CCME, 2001).

$$\bullet \quad \mathbf{F3} = \left(\frac{\mathbf{sncé}}{\mathbf{0.01sncé + 0.01}} \right) \quad \mathbf{(6)}$$

Après avoir établi les formules des trois facteurs, la formule mathématique de l'indice de qualité des eaux (IQE) est donnée par la relation suivante (CCME, 2001) :

$$\bullet \quad \mathbf{IQE} = 100 - \left(\frac{\sqrt{\mathbf{F}_1^2 + \mathbf{F}_2^2 + \mathbf{F}_3^2}}{\mathbf{1,732}} \right) \quad \mathbf{(7)}$$

Conclusion partielle

Cette partie avait pour but de présenter le matériel et les méthodes utilisés au cours des travaux. Le matériel utilisé est constitué de matériel de prélèvement, d'analyse et de dosage des échantillons d'eau ainsi que la verrerie de laboratoire. Les méthodes par spectrophotométrie d'absorption moléculaire (SAM) et la spectrométrie d'absorption atomique (SAA) ont été utilisées pour la détermination des paramètres physico-chimique. La méthode La troisième partie est consacrée aux résultats suivis d'une discussion générale.

TROISIEME
PARTIE :
RESULTATS ET
DISCUSSION

III.1 Résultats

III.1.1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux de forages

Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physico-chimiques utilisées dans cette étude concernent les valeurs minimales et maximales, la moyenne et l'écart-type (Tableau IV). L'évolution des paramètres chimiques varient d'un forage à un autre.

Tableau IV : Valeurs minimales et maximales des paramètres

Paramètres	Unités	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Valeurs guide de l'OMS
Température	T°C	26,5	30	29,087	1,2699	25° à 30°
Ph	-	6	8	6,776	0,72904	6,5<Ph>8,5
Conductivité	µs/cm	80	558	196,533	119,0695	500 à 1500
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/l	0,012	8,6	3,9408	2,567956	50
Nitrites (NO ₂ ⁻)	mg/l	0	1	0,1458	0,347851	3
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/l	0	26	9,6373	8,7492	250
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/l	0	0,6	0,1147	0,18075	0,5
Chlorures (Cl ⁻)	mg/l	0,09	7	3,7227	2,40085	250
Phosphates (PO ₄ ³⁻)	mg/l	0	1,71	0,286	0,52788	< 5
Oxygène dissous	mg/l	0,8	6,9	5,68	2,0274	-
Manganèse (Mn ²⁺)	mg/l	0	6,9	0,92767	1,767784	0,05
Calcium (Ca ²⁺)	mg/l	8,016	44,088	28,16227	11,42497	100
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/l	48,6	329,4	132,9	67,3098	-
Fer (Fe ²⁺)	mg/l	0	0,7	0,2167	0,25142	0,3
TH total	mg/l	3,2	24,4	11,347	5,1133	150

III.1.2. Analyse de la conformité des paramètres des forages

- **Température**

Dans notre zone d'étude, les valeurs de températures enregistrées (figure 8) sont situées dans la fourchette des normes de potabilité ($25^{\circ} \leq T^{\circ}C \leq 30^{\circ}$). La température présente peu de variations d'un forage à l'autre et d'autres restent voisine de la température moyenne annuelle

de la région soit 26.8 °C (Figure 8), avec un minimum de 26.5°C à Gobazra et un maximum de 30°C à Blanoufla, à Dianoufla, à Kangreta et à Zaguieta.

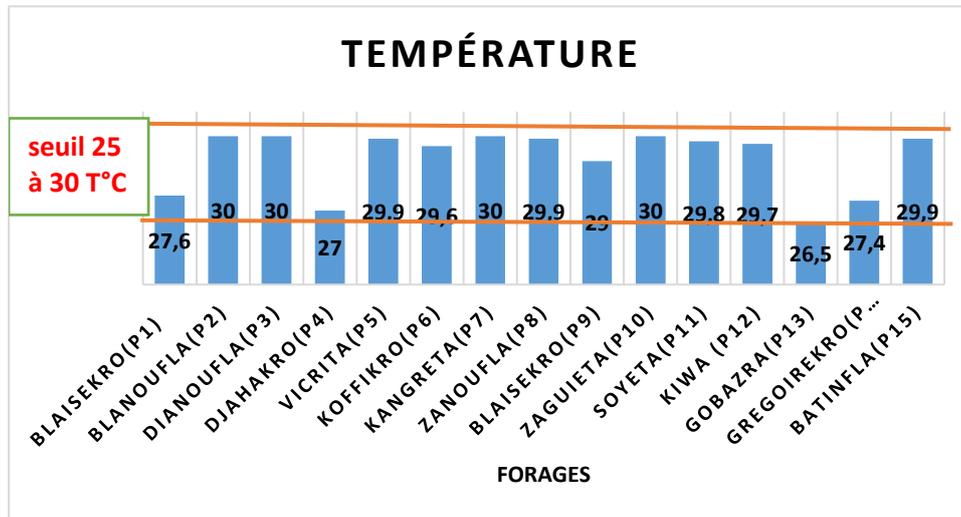


Figure 8 : Variation de la température des eaux de forage des villages de Bonon

- **Potentiel hydrogène (pH)**

Dans ces différents forages, le pH varie entre 6.4 et 8. (Figure 9). Les eaux de cette région ont une tendance acide. L'acidité est d'autant plus importante dans ces forages. Certaines eaux de ces forages dans cette région sont alcaline dont le PH est 8, c'est le cas des villages de Blanoufla, Dianoufla et Zanoufla.

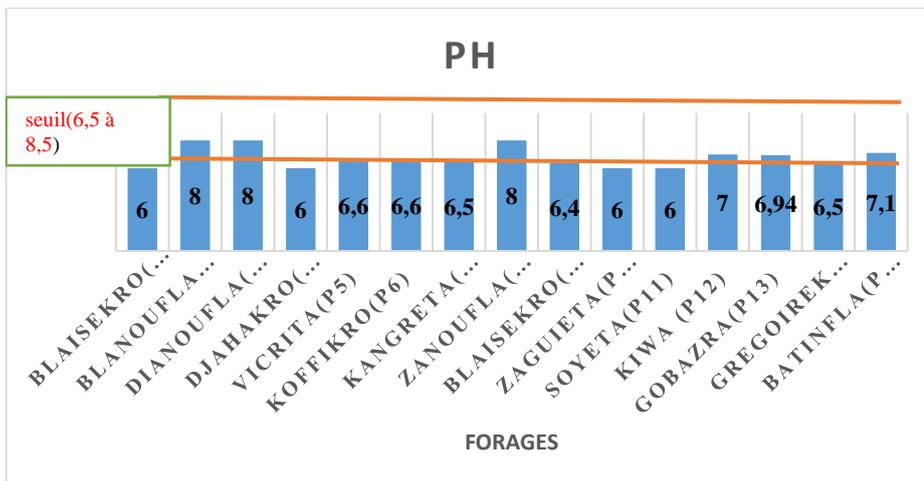


Figure 9 : Variation du pH des eaux de forage des villages de Bonon

- **Conductivité électrique**

L'eau de forage BF207 de la localité de Gobazra est une eau très minéralisée de conductivité électrique (558µS/cm). Certaines eaux de forage sont très faiblement minéralisées avec une

conductivité inférieure à $500\mu\text{S}/\text{cm}$. c'est le cas P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P14 et P15

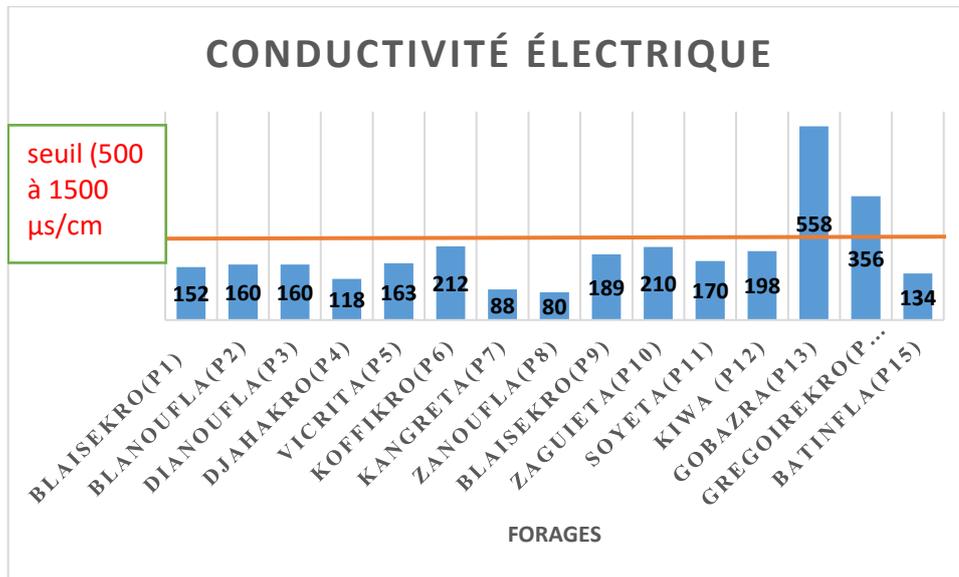


Figure 10 : Variation de la conductivité électrique des eaux de forage des villages de Bonon

- Nitrate (NO_3^-)

De façon générale, les concentrations en ions nitrate sont toutes inférieures aux directives de l'OMS (50 mg/L) (figure11) donc sont conformes selon la valeur guide de l'OMS avec une variation allant de 0 mg/l à 1,7 mg/l.

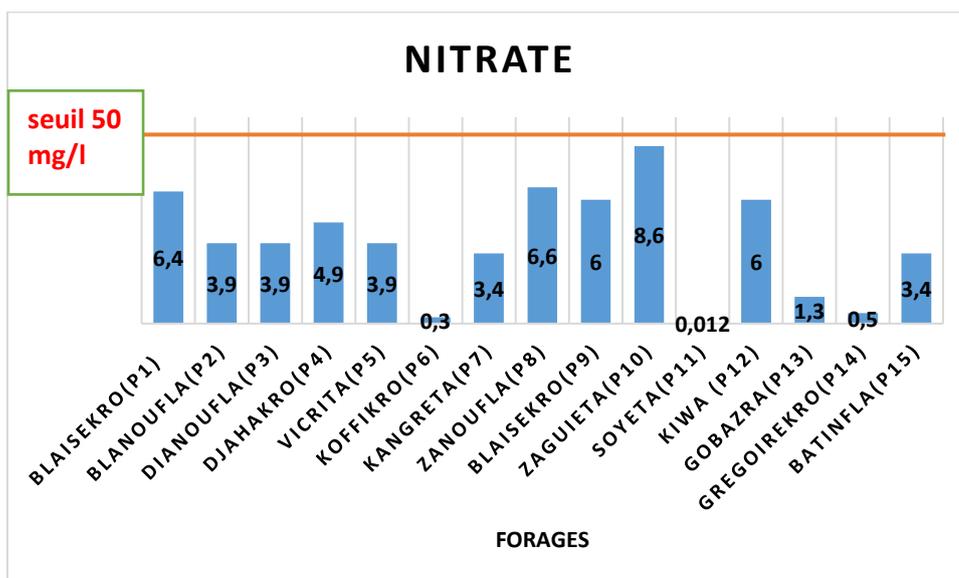


Figure 11 : Variation du nitrate des eaux de forage des villages de Bonon

- Nitrite (NO₂)

Pour ce paramètre, on observe quelques traces d'ion nitrite dans les échantillons d'eau analysés (Figure 12) qui oscillent entre 0,005 mg/l et 1 mg/l, par contre d'autres ne présentent aucune trace d'ion nitrite dans les échantillons d'eau analysés (0 mg/l) donc l'ensemble des forages respectent les normes prescrites par l'OMS (3 mg/l).

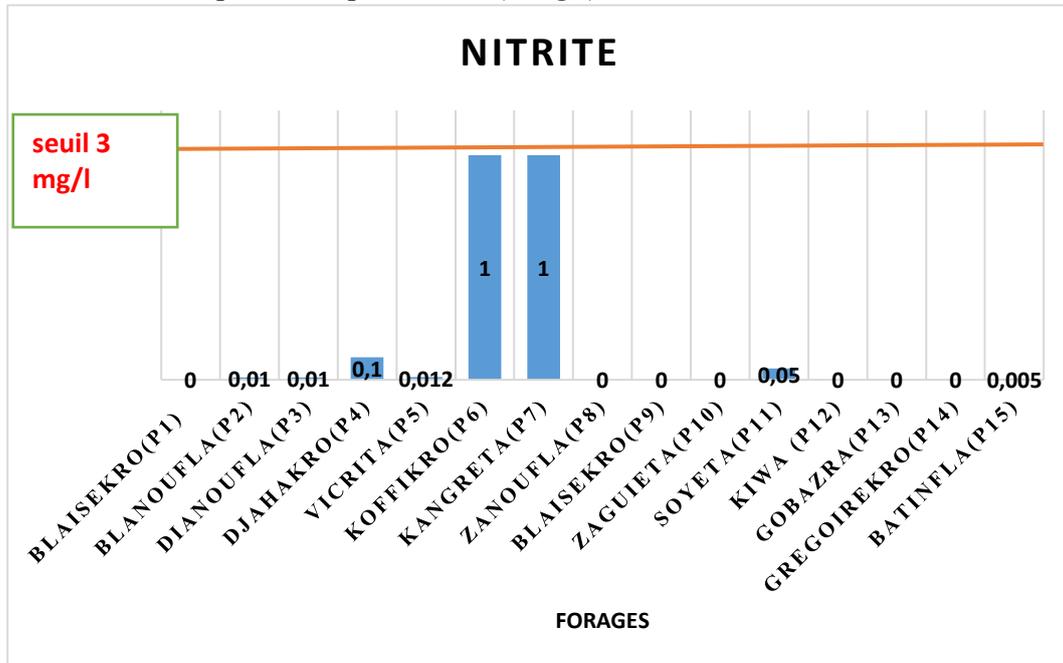


Figure 12 : Variation du nitrite des eaux de forage des villages de Bonon

- Sulfates (SO₄²⁻)

Les teneurs des sulfates dans nos échantillons (Figure 13) oscillent entre 0 mg/l et 26 mg/l et sont d'une manière générale acceptable pour la consommation humaine puisqu'ils n'exercent pas les directives dictées par l'OMS fixée à 250 mg/L.

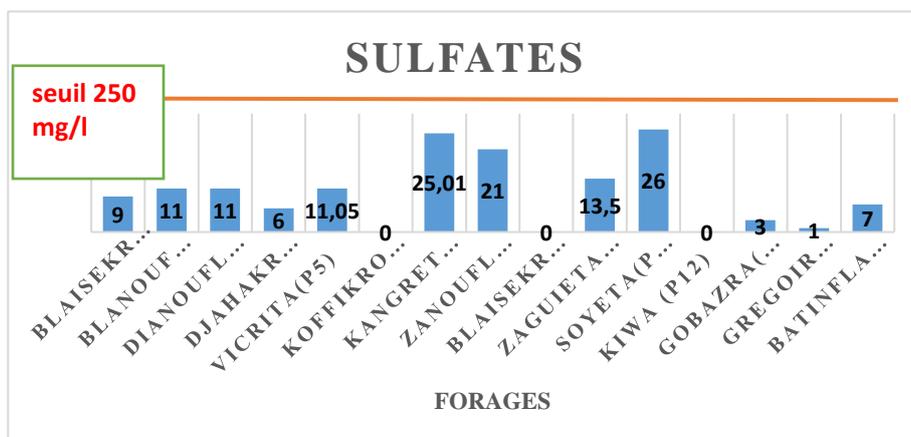


Figure 13 : Variation du sulfate des eaux de forage des villages de Bonon

- **Ammonium (NH₄⁺)**

Les teneurs en ion ammonium dans les zones étudiées (figure14) variaient entre 0 mg/L et 0,6 mg /L. Dans l'ensemble, tous ces forages affichent les valeurs de concentration inférieure aux valeurs dictées par l'OMS (1.5 mg/L).

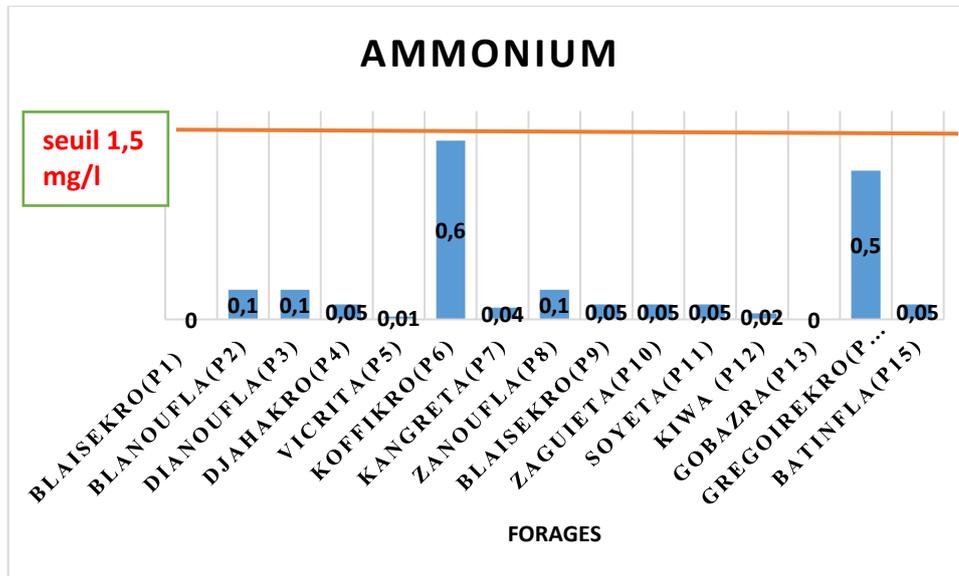


Figure 14 : Variation de l'ammonium des eaux de forage des villages de Bonon

- **Chlorures (Cl⁻)**

Les concentrations du chlorure dans les zones étudiées (figure15) variaient entre 0,09 mg/L et 7 mg /L. Tous les points d'échantillonnage ont affiché des concentrations inférieures aux valeurs dictées par l'OMS (250 mg/l). Cependant, la présence d'autres ions dans l'eau peut influencer sur la saveur en combinaison avec les chlorures. Ainsi, pour une quantité équivalente de chlorures, la saveur peut être moins marquée en présence de calcium et de magnésium. Ils sont aussi susceptibles d'amener une corrosion dans les canalisations et les réservoirs, en particulier pour les éléments en acier inoxydable, pour lesquels les risques s'accroissent à partir de 50 mg/L.

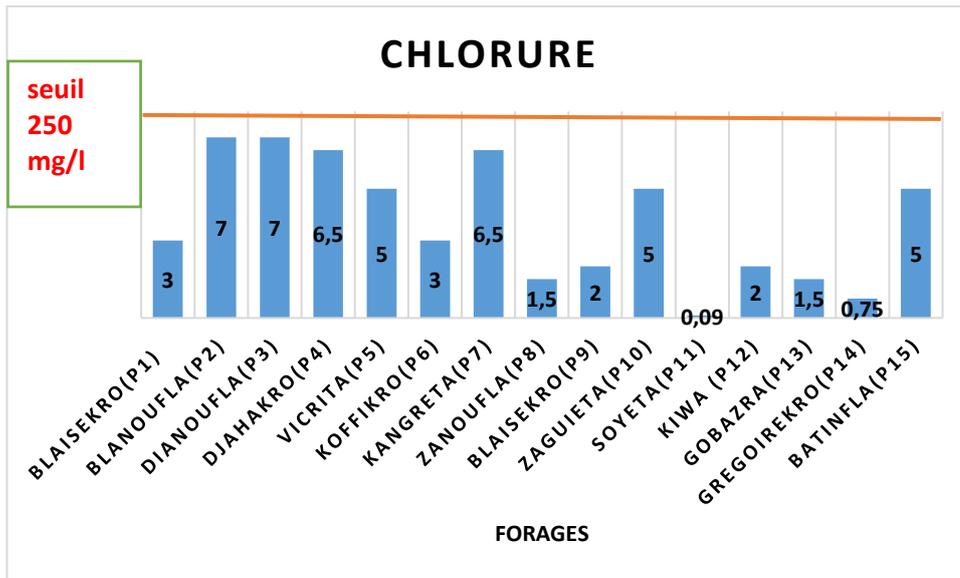


Figure 15 : Variation du chlore des eaux de forage des villages de Bonon

- **Titre Hydrotimétrique**

Les concentrations du Titre Hydrotimétrique dans les zones étudiées (Figure16) variaient entre 3,2 mg/L et 24,4 mg /L. Tous les points d'échantillonnage ont affiché des concentrations inférieures aux valeurs dictées par l'OMS (150 mg/l).

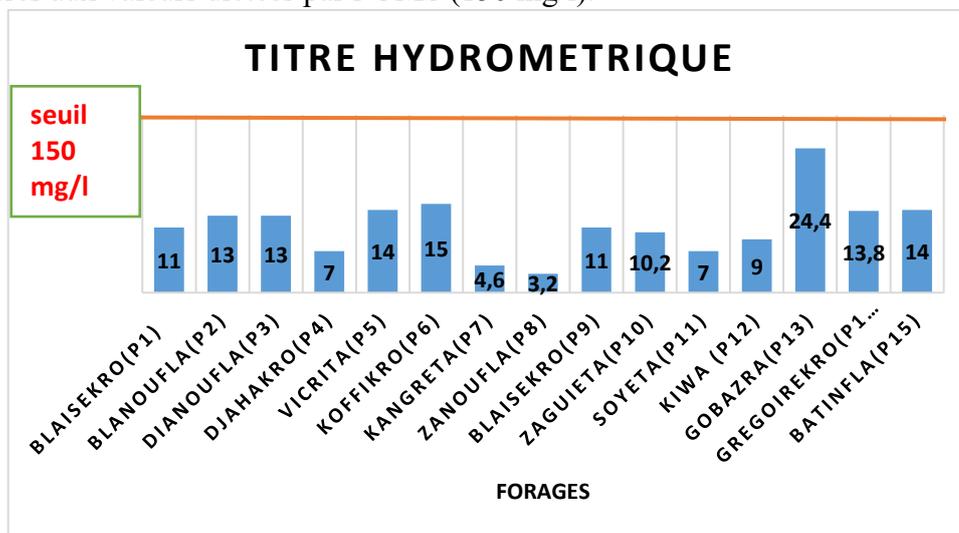


Figure 16 : Variation de la conductivité des eaux de forage des villages de Bonon

- **Fer**

La valeur du fer dans les échantillons étudiés (figure 17) variait entre 0 mg/L à 0.7 mg/L. Il y a 5 échantillons qui affichent des valeurs supérieures allant de 0,34 mg/l à 0,7 mg/. Ce qui est nettement supérieur à la valeur seuil recommandée par l'OMS (0,3 mg/l) pour une eau de boisson. Les forages en question sont P1, P4, P7, P9 et P10.

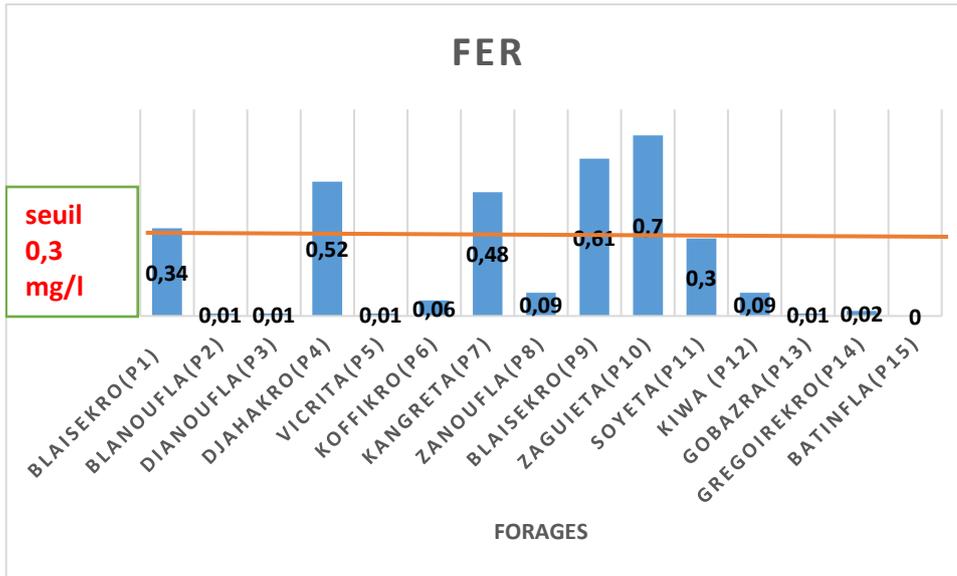


Figure 17: Variation du fer des eaux de forage des villages de Bonon

- **Phosphates**

Les valeurs rencontrées dans les eaux forages des différentes stations sont faibles de l'ordre de 0 mg/L à 1,71 mg/L. Le phosphate fait partie des paramètres dont la totalité des concentrations au niveau de ces forages respectent les directives de l'OMS.

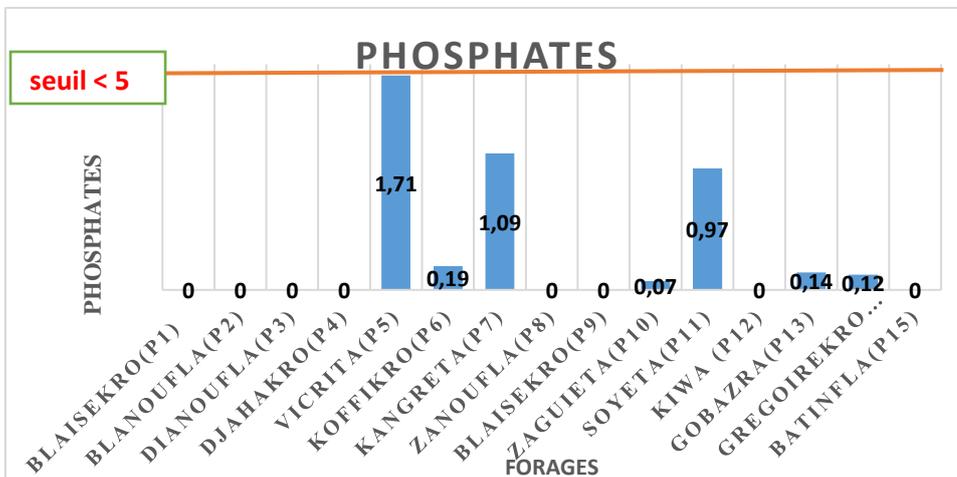


Figure 17: Variation du phosphore des forages par rapport aux normes

- **Manganèse**

Les valeurs du manganèse dans les échantillons étudiés (figure18) oscillent entre 0 mg/L et 6,9 mg/L. Cependant, les forages P3, P4, P6, P7, P8, P10, P11 et P12 ont des valeurs hors norme (0,05mg/L) donc constituent un danger pour une eau de consommation.

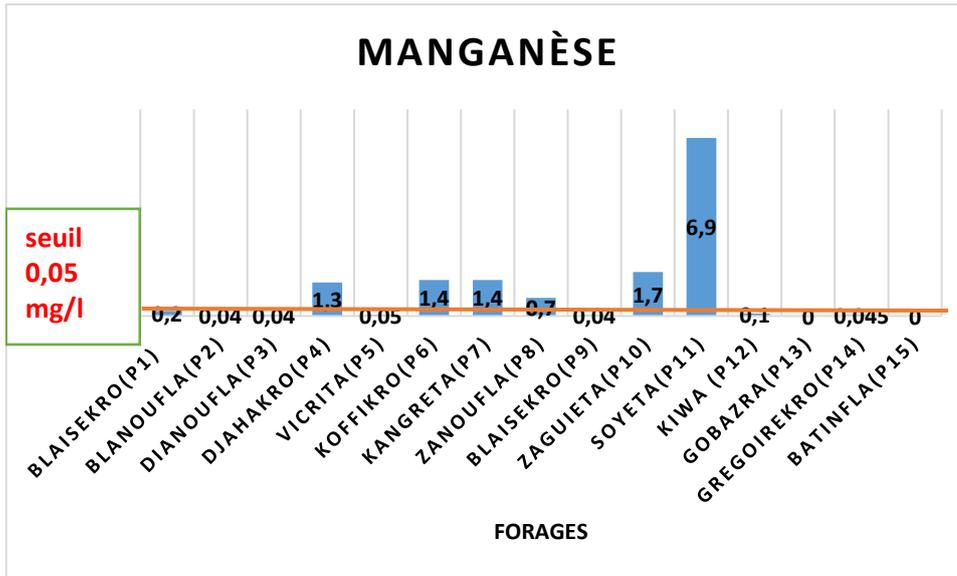


Figure 18: Variation du manganèse des eaux de forage des villages de Bonon

- Calcium

Les valeurs du calcium dans les échantillons étudiés (figure 19) oscillent entre 8,016 mg/L à 44,088 mg/l. toutes les valeurs respectent la limite prescrite par l’OMS (100 mg/l) donc acceptable pour une eau de consommation.

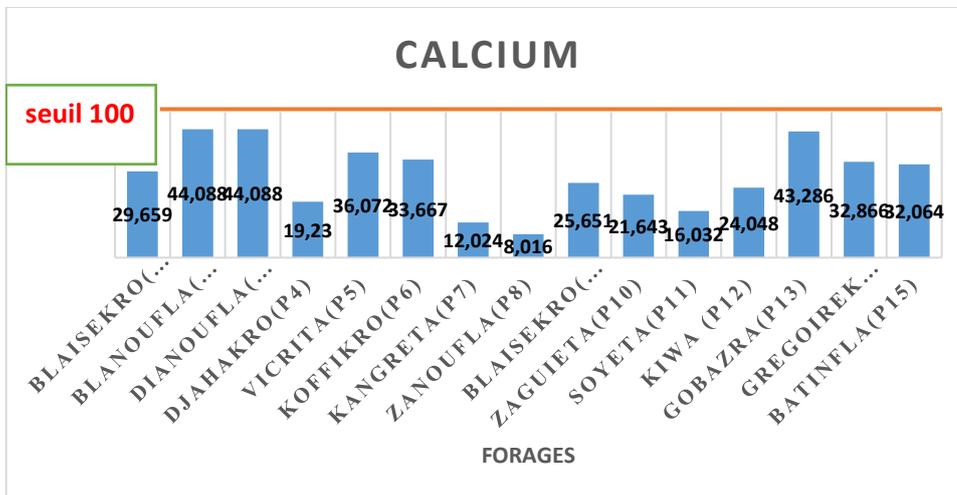


Figure 19: Variation du calcium des eaux de forage des villages de Bonon

- Bicarbonates

Les résultats révèlent que les bicarbonates (Figure 20) subissent une variation d’un forage à un autre. Dans l’ensemble, les concentrations vont de 48,6 mg/L à 329,4 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).

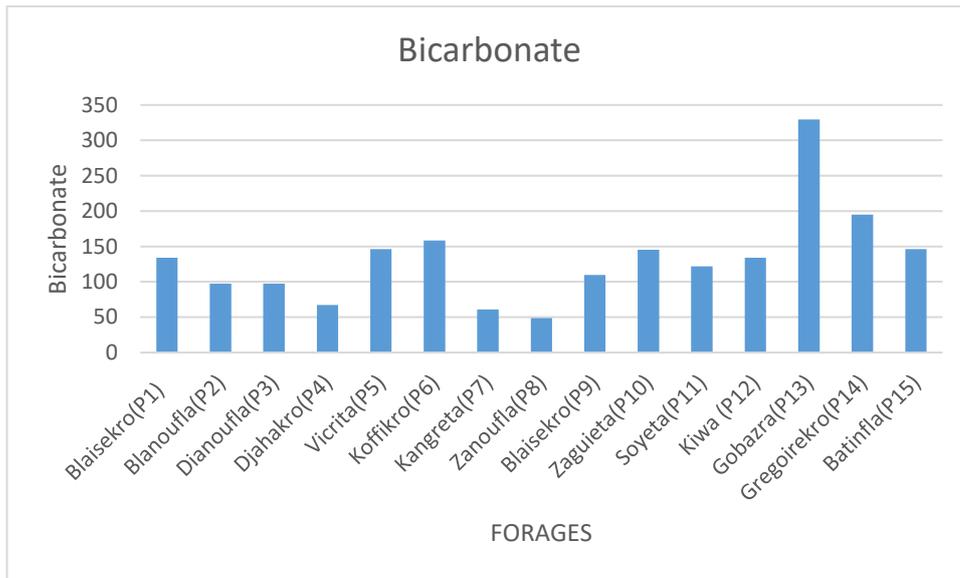


Figure 20: Variation du bicarbonate des eaux de forage des villages de Bonon

- **Oxygène dissous**

Les concentrations de l’oxygène dissous (figure 21) varient de 0,8 à 6,9 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 100 mg/L, il donne un goût désagréable à l’eau (Rodier ,2009).

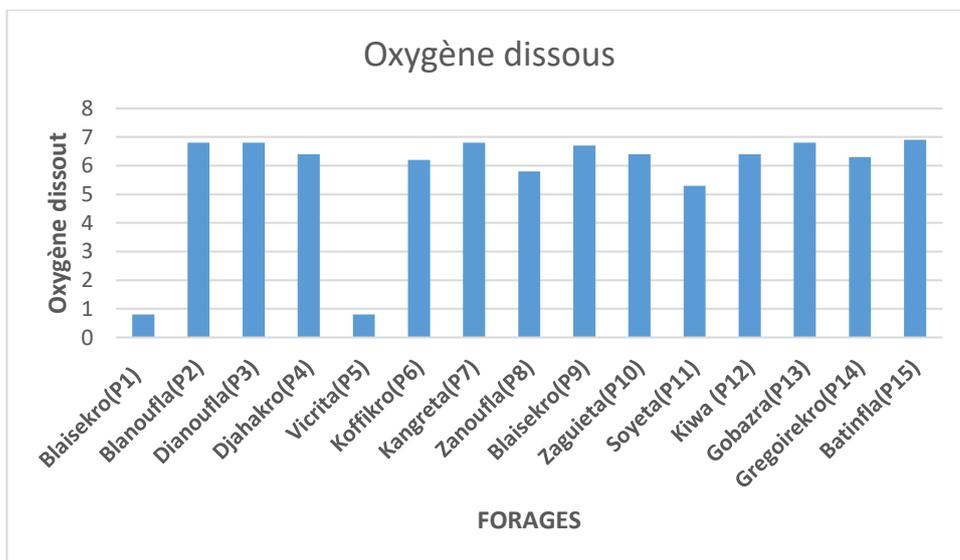


Figure 21: Variation de l’oxygène dissout des eaux de forage des villages de Bonon

III.1.3. Analyse en Composante Principale (ACP)

III.1.3.1. Valeurs propre

Les tableaux V présentent les valeurs propres et les variances exprimés par les principaux facteurs. Les valeurs propres et les coordonnées des échantillons permettent de réaliser les analyses dans les principaux plans factoriels. Parmi ces différents facteurs, le plan factoriel F1-F2-F3 a été choisi car les facteurs F1, F2 et F3 sont susceptibles de fournir le maximum d'informations nécessaires permettant l'interprétation des résultats obtenus. Ces trois facteurs expliquent plus des informations soit un cumul de la variance égal à 63,339 % pour les forages de la commune de Bonon. Le plan factoriel F1-F2 permet dans un premier temps de représenter les cercles de communauté et le plan factoriel F1-F3 permet dans un second temps de représenter les cercles de communauté.

Tableau V : Valeurs propres et pourcentages de variance exprimée

Paramètres	Valeur propre	% Total variance	Cumul Val propre	Cumul %
F1	4,844	32,291	4,844	32,291
F2	2,527	16,845	7,371	49,136
F3	2,130	14,203	9,501	63,339

III.1.3.2. Analyse du plan factoriel F1-F2 et F1-F3

- **Projection des variables dans le plan factoriel F1-F2 et F1-F3**

Le facteur F1 (Figure 22) dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 est déterminé par la conductivité, le sulfate, le nitrate, le calcium, et TH. Cet axe peut être assimilé au caractère minéral des eaux de forages. L'axe F3 dans le plan factoriel F1-F3 est défini par l'ammonium, le phosphate, nitrite, le pH, le manganèse, la température et le ion chlorure. Ce facteur exprime la pollution des eaux par les activités anthropiques et l'intrusion des eaux saumâtres dans la nappe phréatique.

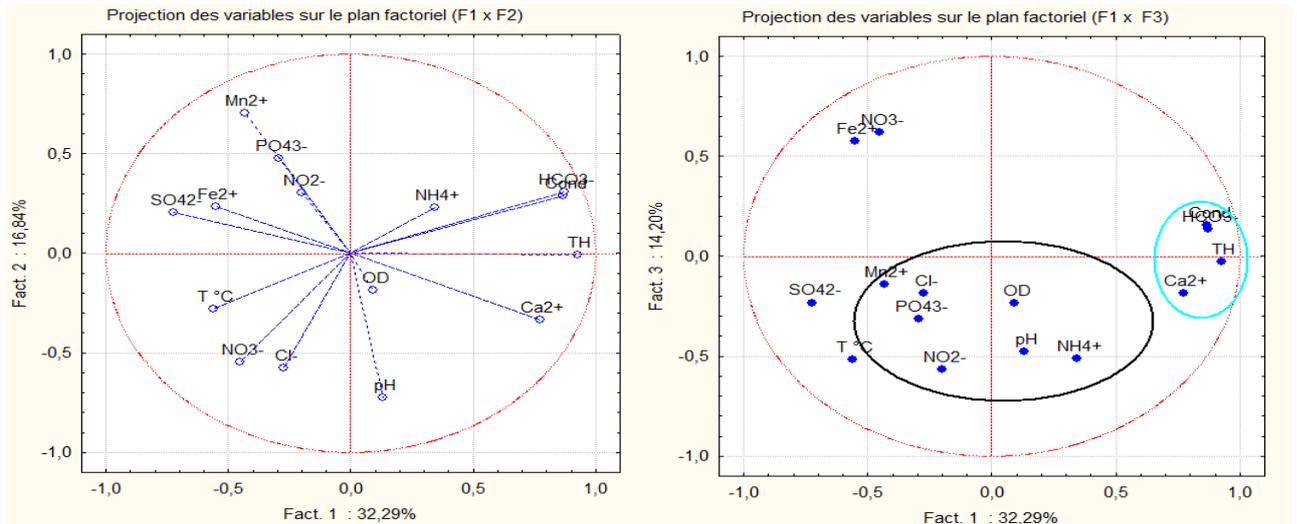


Figure 22: Projection des variables dans les plans factoriels (F1-F2 et F1-F3)

- Projection des forages dans le plan factoriel F1-F2

Le graphe des unités statistiques formé par les axes F1 et F2 (Figure 23) donnant 49,14 % de l'information totale, Selon l'axe F1, on observe un regroupement des eaux peu minéralisées. Selon l'axe F2, nous observons une opposition entre des eaux fortement minéralisées dont une augmentation de la conductibilité électrique et du bicarbonate Ces deux axes permettent de subdiviser le plan en trois groupes de forages qui diffèrent par leur qualité physicochimiques. La classe 1 contient des eaux de forage faiblement minéralisées dans la commune. La conductivité électrique des eaux de ses forages est comprise entre 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux sont pauvres en nitrite et en ammoniacque. On retrouve ces eaux de forages dans les localités de zanoufla (BF013), Kangreta (BF009),Djahakro (BF006)et celle de Soyeta (BF212B). La classe 2 contient des eaux de forage peu minéralisées avec une conductivité électrique comprise entre 134 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 198 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Elles sont caractérisées par une présence de de nitrate et du chlorure. Ces eaux sont beaucoup affectées par les activités anthropiques.

Il s'agit des forages P5, P1, P9, P12, P10, P15, P3 et P2. La classe3 contient des eaux de forages moyennement minéralisées. La conductivité électrique des eaux de forage de cette classe est comprise entre 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 558 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec des concentrations de TH total très élevés. Ces eaux ont les pH presque neutres car compris entre 6,5 et 6,94. Ces points d'eau correspondent aux forages profonds qui captent le socle fracturé. Ces eaux sont riches en bicarbonates, avec des teneurs de 329,4 mg/L à Gobazra, 195,2mg/L à Gregoirekro et 158,6 mg/L à koffikro.

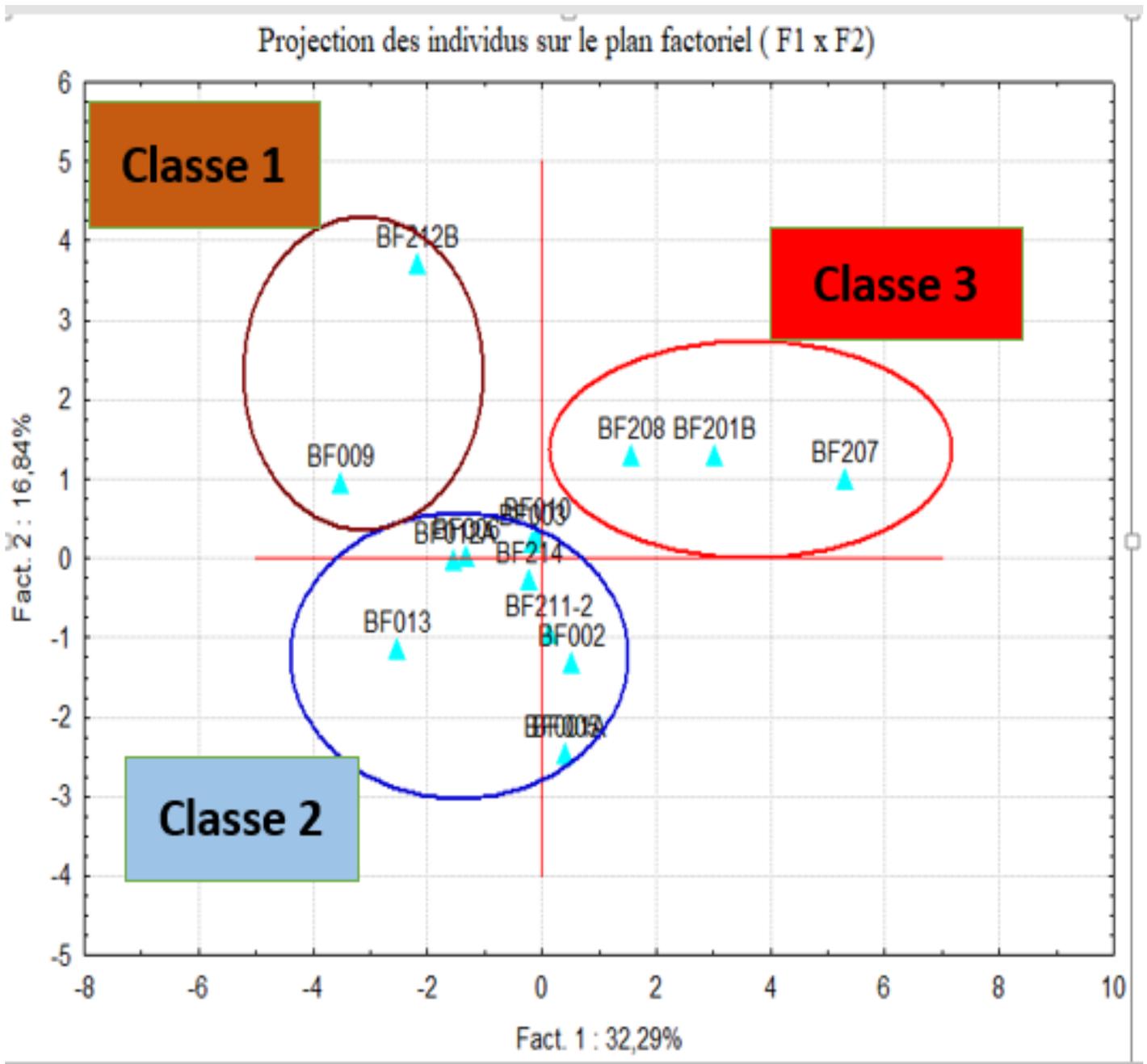


Figure 23 : Représentation graphique de la carte factorielle des forages

III.1.4. Indice de qualité de l'eau des forages

III.1.4.1. Indice de qualité des différents forages

Le tableau VI et la Figure 24 ci-dessous évoquent les résultats des différents paramètres qui conduisent au calcul de l'IQE des forages et le résultat de celui-ci.

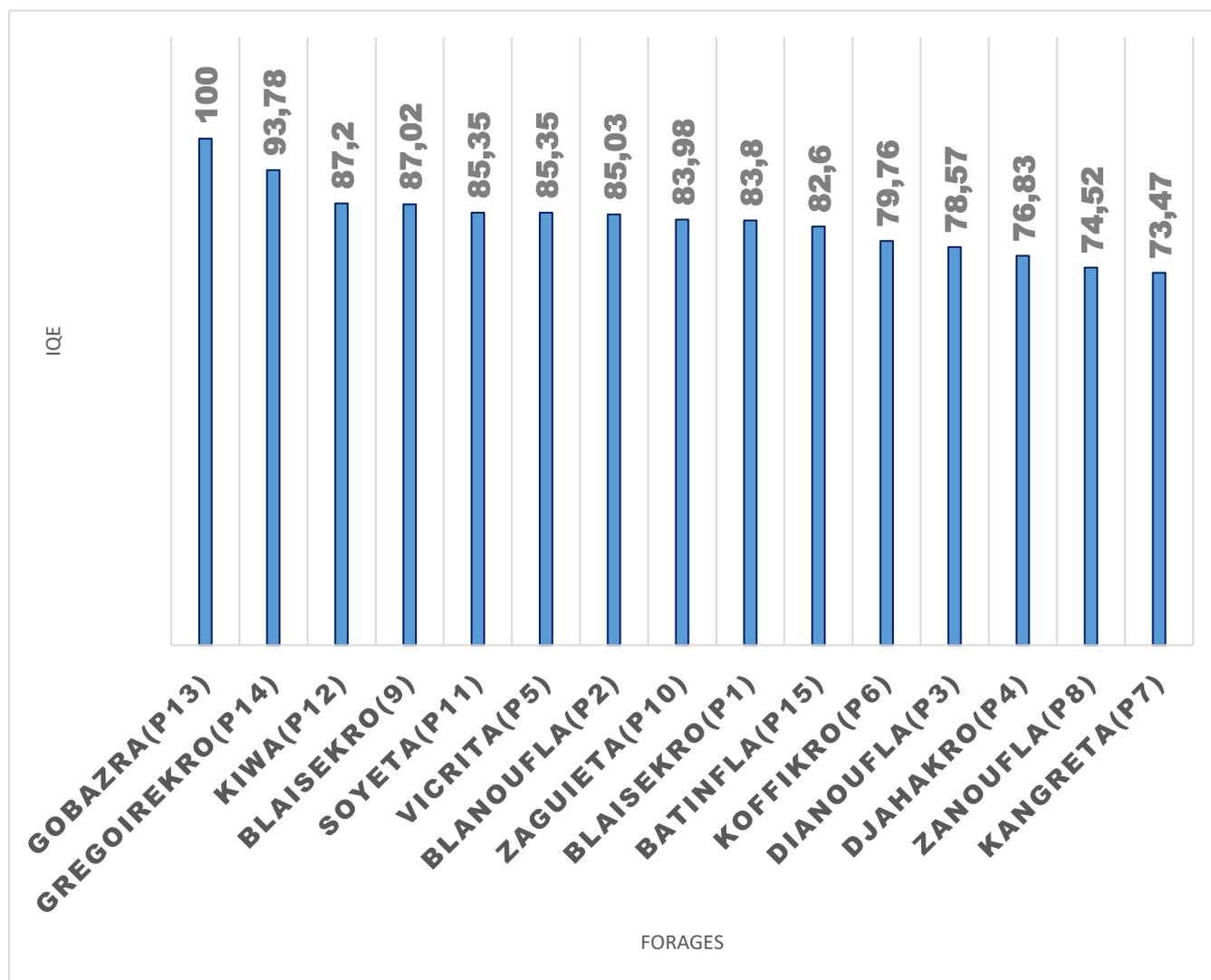


Figure 24: Les valeurs de l'IQE des différents forages

Tableau VI : Classe des potabilités des eaux de forages

Classe de qualité de l'eau	Nombre de forage	Forages
Excellente	01	Gobazra (P13)
Bonne	09	- Gregoirekro (P14) ; -Kiwa (P12) - Blaisekro 2 (P9) ; - Soyeta (P11) - Vicrita (P5) - Blanoufla (P2) - Zaguieta (P10) - Blaisekro (P1) - Batinfla (P15)
Moyenne	05	- Koffikro (P6) - Dianoufla (P3) - Djahakro (P4) - Zanoufla (P8) - Kangreta (P7)

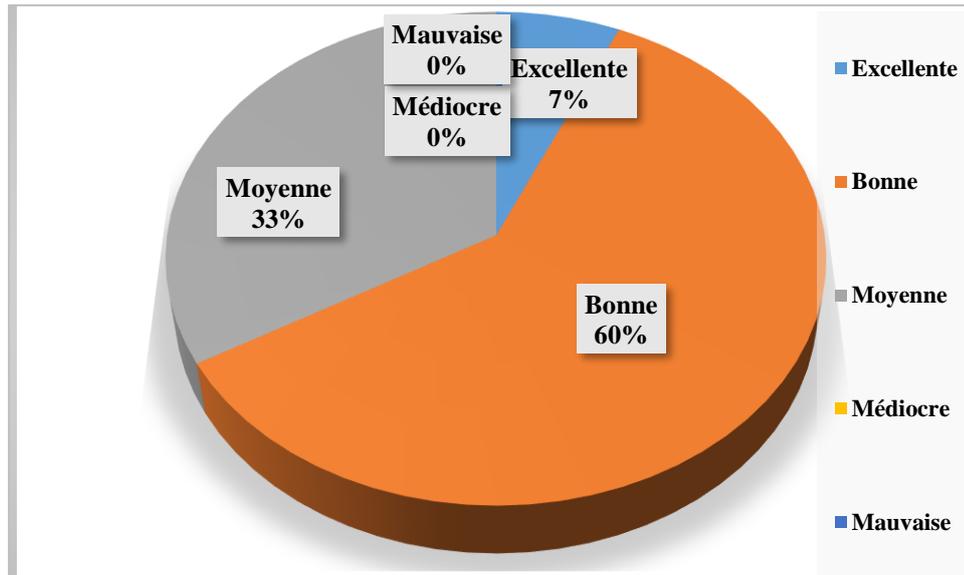


Figure 25 : Pourcentage des forages selon la qualité de l'eau

Les résultats de l'IQE des forages de la commune de Bonon sont consignés sur la Figure 25. Pour le calcul de l'IQE des forages de la commune, quatorze (15) variables telles que : la température, le pH, la conductivité, le nitrates, le nitrite, le sulfates, l'ammonium, Chlorures, TH, Oxygène dissout, Fer, phosphates, Manganèse, le Bicarbonate et le calcium, ont fait l'objet de notre étude. L'analyse de la Figure (24) et du tableau (VI) indiquent que les IQE des quinze (15) forages (P1 à P15) varient de moyenne à excellent. Le forage P13 est doté d'une qualité excellente, soit 7 %. De plus, 60 % des forages étudiés sont d'une qualité bonne. Il s'agit des forages P14, P12, P9, P11, P5, P2, P10, P1 et P15. En fin, Les cinq(05) forages que sont P6, P3, P4, P8 et P7 ont une eau de qualité moyenne soit 33%. Cependant, on note 0 % en qualité médiocre et mauvaise.

III.2 Discussion

La présente étude se propose d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de forages des villages de la commune de Bonon prisées par les populations de Bonon au détriment de l'eau fournie par la société de distribution d'eau de la ville. A l'analyse des résultats physico-chimiques des eaux de forage, quatre (04) paramètres que sont (pH, Conductivité électrique, Mn^{2+} , Fe^{2+}) ont des valeurs non conformes aux directives de l'OMS. La connaissance de la composition physico-chimique des eaux de forages a permis de comprendre l'acquisition de la minéralisation des eaux de forages du bassin versant de la commune de Bonon. Dans l'ensemble, la température des eaux des forages varie entre 26,5°C et 30°C, avec des moyennes autour de 29,087°C \pm 1,27°C. Cette variation de la température de l'eau serait liée à celle de la température

atmosphérique saisonnière de la commune de Bonon. Les valeurs de températures relevées sont en accord avec ce qui est rapporté dans la littérature. En effet, les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles (Rodier, 2009). Le pH altère la croissance et la reproduction des micro-organismes présents dans une eau, la minéralisation et les teneurs en métaux. D'une manière générale, les valeurs de pH obtenues pour ces eaux souterraines sont conformes aux résultats obtenus par d'autres études publiées dans la littérature car dans la plupart des eaux souterraines, le pH est compris entre 6 et 8,5. Elles présentent aussi une légère minéralisation avec une conductivité électrique moyenne de l'ordre de 196,533 μ s/cm.

La conductivité une fois de plus, fait partir des variables dont la plupart des valeurs ne sont pas en conformité avec les normes de l'OMS. En effet, excepter le forage P13 dans la localité de Gobazra, tous les forages ont les valeurs de conductivité non conformes à l'objectif. Rodier (2009) signale que la variation de conductivité est induite par la présence dans le milieu des ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Cette mobilité dépend de la nature des ions dissous et de leur concentration, tels que les ions de calcium (Ca^{2+}), de chlorures (Cl^-), des bicarbonates (HCO_3^-). Généralement, la conductivité électrique augmente avec la concentration des ions en solution et la température (Dib, 2009).

Le fer et le manganèse sont des variables dont certains de leur valeur sont non conformes aux objectifs c'est-à-dire la concentration maximale de fer acceptable dans une eau de boisson est fixée à 0,3 mg/L par l'OMS. Cette norme a été définie pour répondre plus à des critères esthétique et organoleptique qu'à des critères sanitaires. En effet, l'ingestion de fer semble plus nécessaire à l'homme. Cet élément est généralement conseillé aux hommes qui ont une carence en fer. L'eau des forages concernés par la présence élevée en Fer sont les forages P1, P4, P7, P9 et P10. Le niveau de fer constaté pourrait provenir de l'état des forages en termes de conduites anciennes et rouillées et la géologie du sol pourrait expliquer l'aspect peu clair de l'eau de ces forages. (Moussa, 2017). Les teneurs respectives en manganèse au niveau des forages P1, P3, P4, P6, P7, P8, P10, P11 et P12 sont de 0,3 mg/l, 0,5 mg/l, 1,3mg/l, 1,4mg/l, 0,7mg/l, 1,7mg/l, 6,9 mg/l et 0,1 mg/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 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. L'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) définit les valeurs limites de NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , Ca^{2+} , PO_4^{3-} , Cl^- , Mn^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- qui sont

respectivement de 50 mg/l, 3 mg/l, 250 mg/l, 0,5 mg/l, 100 mg/l, 5 mg/l, 250 de mg/l, 0,05 mg/l, 50 mg/l et 0,3 mg/l dans une eau de boisson. 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 formes 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 (François, 2006).

Les nitrates (NO_3^-) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+), présent dans l'eau et le sol, qui est oxydé par les bactéries du genre Nitrobacter (Santé Canada, 1992). Les teneurs en nitrates des eaux des forages échantillonnés dans toutes les localités sont inférieurs à 50 mg/l et varie entre 0,012 mg/L et 8,6mg/L pour une moyenne de l'ordre 4,30mg/l. Cela se traduit par le fait que ces différentes localités n'abritent pas d'importantes exploitations agro-industrielles utilisant d'importantes quantités d'engrais. Cette teneur indique que ces eaux sont de bonne qualité. Nos résultats sont en désaccord avec ceux de (Chapman & Kimstach, 1996) qui ont obtenus des valeurs supérieurs du nitrate. Selon Chapman & Kimstach (1996) des valeurs supérieures indiquent une utilisation excessive de fertilisants utilisés en agriculture. Les décharges incontrôlées constituent des sources potentielles de contamination des eaux souterraines en nitrates. Dans le sol, la matière organique est minéralisée à partir de l'oxydation biologique de l'ammonium en nitrates (Tandia *et al*, 1999). Ainsi, les nombreuses cultures maraîchères pratiquées dans le département de Dimbokro et à sa périphérie concourent à l'augmentation de

la teneur en nitrates des eaux souterraines. Les eaux usées (domestique, industrielle et agricole) rejetées hors des égouts suite à la faible couverture du réseau d'assainissement et estimées à 60% de la production favoriseraient la pollution nitrique des eaux souterraines (Aghzar *et al.*, 2002). Les dépôts sauvages d'ordures dans les quartiers constituent une source de production de nitrates et par conséquent de pollution diffuse de la nappe par les nitrates issus du lessivage du sol (Tandia *et al.*, 1997).

La dureté ou titre hydrotimétrique (TH) d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques à l'exception de ceux des métaux alcalins et de l'ion hydrogène. Dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium et magnésium auxquels s'ajoutent quelque fois les ions fer, aluminium, manganèse (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). 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 Composantes Principales a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région. En effet, l'origine des ions dans les eaux de forages est contrôlée par le contact eau-roche. L'ACP révèle une corrélation entre la conductivité électrique et les ions en solution. Ces corrélations reflètent l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation de l'eau souterraine de la commune de Bonon. Cette corrélation de la conductivité avec ces ions majeurs rend compte de la minéralisation ou du phénomène de l'hydrolyse des minéraux (Ahoussi *et al.*, 2010).

En outre, on peut croire que la minéralisation reste faible de façon générale pour l'ensemble des eaux de forages.

La détermination des paramètres tel que les variables non conformes aux objectifs, le nombre total de variables, le nombre de résultats analytiques ne respectant pas les objectifs et nombre total de résultats ont permis de calculer les valeurs de F1, F2, F3 et IQE à partir des formules

respectives présentées plus haut. Le calcul individuel de l'IQE des quinze (15) forages à conduire à trois classes d'eau.

La première classe est constituée des forages P3, P4, P6, P7, et P8 dotés de qualité d'eau moyenne. La valeur de l'IQE varie de 73,47 à 79,76. Pour cette tranche d'eau, la qualité de l'eau des forages P3, P4, P6, P7, et P8 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, P2, P5, P9, P10, P11, P12, P14 et P15. La valeur de l'IQE varie de 83,80 à 93,78. Ici, les valeurs du nitrate dans ces différents forages ne sont pas nulles, ils varient de 3,9 mg/l à 6,9 mg/l. La présence du nitrate dans ces forages 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 tranche d'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure est observée.

La troisième classe constituée du forage P13 est d'une excellente qualité avec pour valeur de l'IQE 100. Les paramètres au niveau du forage P13 sont tous en accord avec les normes de l'OMS. Cependant les valeurs de conductivité et du manganèse au niveau de ces 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 qualifiée d'excellent est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration est décelée et les conditions sont très proches des niveaux naturels ou originels.

CONCLUSION

Les eaux de forages sont encore pour des populations rurales de la commune de Bonon, des sources importantes d'approvisionnement en eau potable. Ce présent travail a pour objectif d'évaluer la qualité des eaux de forages de la commune de Bonon.

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 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 que les paramètres en accord avec les valeurs guidant de l'OMS (2017) et ceux dont les concentrations visent la détérioration de la qualité d'eau de forages.

Les différents résultats de l'ACP ont permis de classer l'eau des forages en trois classes. La première classe est caractérisée par des eaux faiblement minéralisées. La deuxième classe est caractérisée par des eaux de forages peu minéralisées. La troisième classe 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 individuel de l'IQE des quinze (15) forages à conduire à trois classes d'eau. La première classe constituée de 33 % des forages soumis à notre étude est dotée de qualité d'eau moyenne. La deuxième classe d'eau de bonne qualité comprend 60 % des forages et la dernière classe constituée de 7 % 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 Bonon 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...

Enfin, face à ces recommandations faites aux populations et aux autorités administratives cette étude ouvre des voies à des perspectives suivantes :

- Evaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de forages
- Proposer un système de traitement chimique de ces ressources ;
- Evaluer l'impact de la pollution chimique de ces ressources sur la santé des consommateurs

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.
- Anonyme 1. (2020). UVICOCI : Union des Villes et Communes de Côte d'Ivoire- Présentation de la commune de Bonon (<http://uvicoci.ci/accueil/communedetail/218>, consulté le 10 Aout 2020)
- Alpha S.M. (2005). Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribué par l'EDM. SA dans la ville de Bamako : Evaluation saisonnière. Thèse de doctorat. Faculté de médecine de pharmacie et d'odonto stomatologie. Université de Bamako (Mali), 77 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.
- Ballouki K. (2012). Etude de la Qualité Physico-chimique et Biologique de trois Sources dans la Région de Midelt (Haut Moulouya), Mémoire de Master en Hydraulique Option : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah (Fès, Maroc), 79 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.
- 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 de l'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.
- 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.
- 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), 102 p.
- Chemseddine F, Abderrahmane B, Abdelkader R, Elias S. (2009). Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien) *Afrique Science* : 217-231
- 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.
- Coulibaly S. (2014). Potentialités de production mellifère de la flore de transition forêt savane, en zone Guinéenne et caractérisation pollinique et physico-chimique de quelques miels de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193 p.
- Coulibaly B., Krouba D.I., Kouakou A.A.C., Ouattara A.A., Berté D., Ta-bi T.D., Rayaisse J. P., Jamonneau V., Solano Ph., Koffi Y.J.J., Kaba D., Courtin F., Assi-Kaudjhis J.P. & Anoh K.P. (2019). Conséquences sanitaires de la dynamique du paysage rural dans le foyer de trypanosomiase humaine africaine (tha) de Bonon (Côte d'Ivoire) Entre 2002 et 2015. *Revue Espace, Territoires, Sociétés et Santé*, 1 (2) : 19-36.
- Degremont G. (2005). « Mémento technique de l'eau », 10ème éd, tom1 : Tec et doc, 131 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.

- DNH (2004). Guide Methodologie des projets d'alimentation en eau potable. Première édition. Mali, 184 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.
- FAO. (1996). Irrigation and drainage. *Control of water pollution from agriculture*. 55 p.
- François L. (2006). Les pollutions des ressources en eau par l'agriculture dans l'ouest de la France. L'eau, source de vie, source de conflits, 15ème forum du Monde Diplomatique, les Carrefours de la Pensée, Rennes (France), pp.143-150.
- Gaujour 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.
- Guergazi S. & Achour S. (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra (Algérie). Pratique de la chloration, *Larhyss Journal*, 4 : 119-127.
- Hawa S. (2002). 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'état en Pharmacie, 77 p.
- 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). Données sociodémographiques et économiques des localités, résultats définitifs par localités. RGPH 2014, 47 p.
- 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.
- Koaukou A.C.A., Coulibaly B., Kaba D., Anoh K.P. & Courtin F. (2018) Dynamique de peuplement et modification paysagère dans le parc national de la Marahoué (Côte d'Ivoire). *Tropical ture*, 36 : 206-216.
- Koukougnon W.G. (2012). Milieu urbain et accès à l'eau potable : cas de Daloa (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat en Géographie, Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 363 p.
- Laferriere M., Nadeau A. & Malenfant G. (1995). La contamination par les nitrates : Prévention des risques à la santé, 38 p.
- 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., Berrahoul A. & Clooster M. (2011). Contribution à l'étude physicochimique 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). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 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.
- 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. (2006). Paludisme: lutte antivectorielle et protection individuelle, Série de Rapports techniques, N°936, 71p.
- OMS (2011). Directives de qualité pour d'eau de boisson, Quatrième édition, Genève, suisse, 55 p.
- OMS. (2011). Directives de qualité pour l'eau de boisson. 4ème édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse : 307-447.
- OMS (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson. 4ème édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé, Genève, Suisse, 539 p.
- 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.
- Raja P., Muhindhar A., Elangovan R. & Palanivel M. (2008). Evaluation of physical and chemical parameters of river Kaveri, Tiruchirappalli, Tamil Nadu (India). *Journal of Environmental Biology*, 29(5) : 765-768.
- 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. 9ème 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.
- Scanlon B.R., Reedy R.C., Stonestrom D.A., Prudic D.D.D.E & Dennehy K.F. (2005). Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Biol*, 11: 1577-1593.
- 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.

- Servais P., Billen G., Garcia-Armisen T., George I., Goncalvez A. & Thibert S. (2009). La contamination microbienne dans le bassin de la Seine. Edition. Agence de l'Eau Seine Normandie, 50 pp.
- Soro N. (2002). Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. Thèse de Doctorat d'État es Sc. Nat., Université de Cocody (Abidjan, Côte d'Ivoire), 272 p.
- 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. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 10(3) : 1382-1402.

ANNEXE

ANNEXE 1 : Procédure d'analyse par spectrophotomètre

Dosage par le spectrophotomètre :

Les ions Bicarbonates (HCO_3^-), Ammoniaque (NH_3), Fer total (Fe), Nitrates (NO_3^-) et Nitrites (NO_2^-) ont été déterminés par la méthode de spectrophotométrie d'absorption moléculaire à l'aide d'un spectrophotomètre DR 6000. La méthode est identique pour ces ions:

- Mettre l'appareil sous tension et attendre quelques secondes pour l'étalonnage automatique interne du signal ;
- Sélectionner le programme correspondant à l'ion que l'on désire analyser ;
- Appuyer sur démarrer
- Transférer la quantité de référence à analyser dans la cuve ;
- Transférer le contenu de la pochette de réactif correspondant à l'ion recherché ;
- Appuyer sur l'icône représentant la minuterie. Appuyer sur ok, une période de réaction correspondant à l'ion à analyser apparaît.
- Préparer également un blanc correspondant à l'échantillon sans addition d'un réactif ;
- Lorsque la minuterie retentit, essuyer l'extérieur de la cuve et l'introduire dans le compartiment du spectrophotomètre ;
- Commencer par le blanc et appuyer sur zéro, l'indication suivante apparaît : 0,0 mg/L ;
- Introduire par la suite la cuve contenant l'échantillon préparé contenant le réactif ;
- Appuyer sur lire et noter la valeur qui s'affiche

ANNEXE 2 : Méthodes du dosage volumétrique ou titrimétrique

Le TH, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , le TAC, les ions Chlorures ont été déterminés par la méthode de volumétrie.

Méthode de dosage du TH

Mettre 50 mL d'échantillon dans un ballon à fond plat de 250 mL contenant un barreau aimanté, ajouter 4 mL de pH 10 et 2 gouttes de noir Eriochrome T. La solution ainsi préparée est déposée sur un agitateur magnétique et dosée avec de l'EDTA (sel disodique d'Acide Ethylène Diamine Tétraacétique). Le virage passe du rose au bleu.

La concentration s'exprime selon la formule suivante :

$$\text{TH en mg/L} = 1000 \times \frac{C \times V_1}{V_2}$$

C représente la concentration de la solution titrant EDTA ;
V1 est le volume de la solution titrant EDTA utilisé pour le titrage ; V2 est le volume de l'échantillon dosé.

Méthode de dosage du TAC

Dans 100mL d'échantillon mettre 2 à 3 gouttes de l'indicateur mixte (vert de bromocrésol et rouge de méthyle) et doser avec l'acide chlorhydrique (HCl) à 0,02 N le virage passe du bleu, vert clair au gris. Le dosage s'effectue au $\text{pH} \geq 8.83$ donc TA est nul.

Méthode de dosage des ions chlorures

Le principe est basé sur un dosage en retour. Dans 100mL d'échantillon, ajouter 1 ml d'une solution de chromate de potassium à 100g/L et titrée avec une solution de nitrate d'argent jusqu'à obtenir une couleur brun rougeâtre. La concentration en chlorure est obtenue et exprimée en mg/L par la formule :

$$C_{\text{Cl}} = \frac{(V_s - V_b) \times f}{V_a}$$

Vs est le volume de la solution titrante de nitrate d'argent utilisé pour le titrage de l'échantillon ; Vb est le volume de la solution titrante de nitrate d'argent utilisé pour le blanc, Va est le volume de l'échantillon et f le facteur de conversion qui est égal à 35453 mg/mol.

ANNEXE 3 : résultats des paramètres physico-chimiques des eaux de forages après analyse

	Forages														
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	15
Paramètres	Valeurs														
Physiques															
Température	27,6	30,0	27,4	27,0	29,9	29,6	30,0	29,9	29,0	30,0	29,8	29,7	26,5	27,4	29,9
pH	6,0	8,0	6,2	6,0	6,6	6,6	6,5	8,0	6,4	6,0	6,0	7,0	6,94	6,5	7,1
Conductivité (µS/cm)	152,0	160,0	104,0	118,0	163,0	212,0	88,0	80,0	189,0	210,0	170,0	198,0	558,0	356,0	134,0
Chimiques															
HCO ₃ ⁻ (bicarbonates) mg/l	134,2	97,6	61,0	67,1	146,4	158,6	61,0	48,6	109,8	145,4	122,0	134,2	329,4	195,2	146,4
TH total (°F)	11,0	13,0	7,2	7,0	14,0	15,0	4,6	3,2	11,0	10,2	7,0	9,0	24,4	13,8	14,0
Chlorures (°F)	3,0	7,0	6,5	6,5	5,0	3,0	6,5	1,5	2,0	5,0	0,09	2,0	1,5	0,75	5,0
Fer (mg/l de fe total)	0,34	0,01	0,04	0,52	0,01	0,06	0,48	0,09	0,61	0,7	0,3	0,09	0,01	0,02	0,0
Manganèse (mg/l de Mn ²⁺)	0,2	0,04	0,5	1,3	0,05	1,4	1,4	0,7	0,04	1,7	6,9	0,1	0,0	0,045	0,0
Oxygène dissout (mg/l)	0,8	6,8	6,8	6,4	0,8	6,2	6,8	5,8	6,7	6,4	5,3	6,4	6,8	6,3	6,9
Nitrates (NO ₃ ⁻ en mg/l)	6,4	3,9	4,5	4,9	3,9	0,3	3,4	6,6	6,0	8,6	0,012	6,0	1,3	0,5	3,4
Nitrites (NO ₂ en mg/l)	0,0	0,01	0,01	0,1	0,012	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,05	0,0	0,0	0,0	0,005
Ammonium (mg/l)	0,0	0,1	0,0	0,05	0,01	0,6	0,04	0,1	0,05	0,05	0,05	0,02	0,0	0,5	0,05
Sulfates (SO ₄ ²⁺ en mg/l)	9,0	11,0	23,0	6,0	11,05	0,0	25,01	21,0	0,0	13,5	26,0	0,0	3,0	1,0	7,0
phosphates (mg/l de PO ₄ ³⁻)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,71	0,19	1,09	0,0	0,0	0,07	0,97	0,0	0,14	0,12	0,0
Calcium (Ca ²⁺ mg/l)	29,659	44,088	10,20	19,23	36,072	33,667	12,024	8,016	25,651	21,643	16,032	24,048	43,286	32,866	32,064

RESUME

L'étude a pour objectif d'évaluer la qualité chimique des eaux de forage de la commune de Bonon. 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). Excepté 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, une méthode d'analyse statistique (ACP) et une méthode de calcul de l'IQE ont été appliquées. L'ACP a permis de classer l'eau des forages en trois classes quant à leur niveau de minéralisation. La première classe est caractérisée par des eaux faiblement minéralisées, la deuxième classe est caractérisée par des eaux de forages peu minéralisées et la troisième classe est caractérisée par des eaux de forages moyennement minéralisées. Le calcul de l'IQE des quinze forages a permis de classer l'eau en trois classes, 33 % des forages ont une qualité d'eau moyenne, 60 % des forages ont une bonne qualité d'eau et 7 % des forages sont dotés d'une excellente qualité.

Mots clés : Evaluation, indice de qualité de l'eau, qualité chimique, eaux de forages, commune de Bonon.

ABSTRACT

The 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, a statistical analysis method (PCA) and a method for calculating the WQI were applied. The PCA is used to classify borehole water into three class groups in terms of their level of mineralization. The first class is characterized by weakly mineralized waters, the second class is characterized by mineralized borehole waters and the three class 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. 33 % of boreholes have average water quality, 60 % of boreholes have good water quality and 7 % of boreholes have excellent quality.

Keywords: Evaluation, Water Quality Index, quality chemical, drilling water, twonship of Bonon

