



Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux de forages exploitées par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

**SPECIALITE : GENIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT ET DES AMENAGEMENTS
HYDRO-AGRICILES (GEAAH)**

Présenté et soutenu publiquement le 19 Juillet 2024 par

Yibula Steven BASSOLE (20180067)

Encadrant 2iE : Dr Boukary SAWADOGO, Maitre de Conférences (CAMES), Enseignant Chercheur en Eau et Assainissement à l'Institut 2iE

Maître de stage : M. Amadou SAWADOGO, Chef de la station de production d'eau potable de l'ONEA à Paspanga

Structure (s) d'accueil du stage : **Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA)**

Jury d'évaluation du mémoire :

Présidente :

Dr Helas KAROUI

Membres et correcteurs :

Dr Seyram Kossi SOSSOU (Maitre-Assistant CAMES)

Dr Moussa Bruno KAFANDO

Promotion 2023-2024

Dédicaces

À mes chers parents, Justin BASSOLE et Brigitte KANSOLE pour leur amour infini, leur soutien inconditionnel et leurs sacrifices qui ont rendu possible chaque étape de mon parcours académique.

À mes sœurs bien-aimées, pour leur encouragement constant, leur compréhension et leur présence joyeuse qui ont illuminé mes jours les plus sombres.

À toute ma grande famille, pour leur soutien indéfectible, leurs prières et leur fierté qui m'ont inspiré à persévérer dans mes efforts.

À vous tous, je dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon affection sincère.

Remerciements

Avant tout, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de mémoire. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes et institutions dont le soutien et l'accompagnement ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire, notamment :

- ✚ À l'Institut 2iE, représenté par son Directeur Général, Pr **El Hadji Bamba DIAW**, ainsi qu'à l'ensemble du corps professoral de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour la qualité de la formation et les compétences acquises au cours de ces deux années d'études.
- ✚ À Dr **Boukary SAWADO**, Maître de Conférences (CAMES), Enseignant-chercheur en Eau et Assainissement, mon encadreur, pour sa guidance, ses conseils avisés, son soutien ainsi que sa patience dont il a fait preuve tout au long de cette recherche. Ses encouragements et son expertise ont été inestimables pour mener à bien ce travail.
- ✚ À M. **Amadou SAWADO**, Chef du service Production d'eau de l'ONEA à Paspanga, mon maître de stage, pour m'avoir encadré et conseillé tout au long de nos recherches et toute l'aide qu'il nous a apporté durant notre stage ;
- ✚ À M. **R G Noël TINDOURE** et M. **Moustapha OUEDRAOGO** qui ont apporté un accompagnement et un soutien précieux.
- ✚ À Monsieur le Directeur Général de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement de m'avoir permis de faire ce stage de fin de cycle au sein de son établissement ;
- ✚ À tout le personnel du laboratoire Central et de la station de traitement pour l'accueil, leur disponibilité et contributions ;
- ✚ À tous mes amis et camarades de promotion pour les bonnes relations que nous avons entretenues.

Résumé

L'accès à une eau potable de qualité est un enjeu essentiel pour la santé et le bien-être des populations urbaines. Dans la ville de Ouagadougou, capitale du Burkina Faso, l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) exploite activement des forages répartis dans diverses zones de la ville, en particulier dans les quartiers périphériques. Pour l'adoption d'actions de protection de ces points d'eau contre les impacts des phénomènes naturels et des activités anthropiques, une bonne connaissance de la ressource est nécessaire. Cette étude vise l'amélioration de la qualité de l'eau distribuée à travers la caractérisation des eaux de forage exploitées par l'ONEA pour le réseau de distribution de la ville de Ouagadougou. Pour ce faire, des prélèvements d'eau ont été effectués au niveau de 28 forages pendant la période des hautes eaux. Une cartographie de localisation de ces forages a été élaborée puis, les paramètres physico-chimiques et microbiologiques des échantillons d'eau ont été analysés. Les résultats obtenus montrent que 25% des échantillons présentent une pollution aux nitrates, 10% des forages une pollution au fer. Aussi des éléments traces métalliques, d'aluminium (en excès dans un seul forage soit 3,57% des échantillons), d'arsenic (en excès dans deux forages soit 7,14% des échantillons) et de plomb (en excès dans sept forages soit 25% des échantillons), ont été détectés dans certains forage dépassant quelquefois les normes de potabilité en vigueur au Burkina Faso pour les eaux de boisson. Les analyses microbiologiques ont mis en évidence la présence dans 25% des forages traduisant ainsi une contamination de ces points d'eau. Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur les ions majeurs ont mis en évidence un degré de minéralisation, et un degré de pollution. Ces deux gradients ont permis de regrouper les forages en trois catégories : fortement minéralisés, moyennement minéralisés avec une pollution aux nitrates, et faiblement minéralisés. Le diagramme de Piper a permis de noter que le faciès bicarbonaté calcique et magnésique est dominant (92,85% des forages) devant le faciès chloruré/nitraté calcique et magnésique (7,14% des forages). Pour réduire les risques sanitaires pour les consommateurs et améliorer la production d'eau des recommandations ont été formulées.

Mots clés :

Eau souterraine, eau de forage, caractéristiques physicochimiques, caractéristiques physicochimiques, qualité des eaux, Ouagadougou.

Abstract

Access to quality drinking water is an essential issue for the health and well-being of urban populations. In the city of Ouagadougou, the capital of Burkina Faso, the National Office for Water and Sanitation (ONEA) is actively operating boreholes in various areas of the city, particularly in the outlying districts. For the adoption of actions to protect these water points against the impacts of natural phenomena and anthropogenic activities, a good knowledge of the resource is necessary. This study aims to improve the quality of the water distributed through the characterization of the borehole water used by ONEA for the distribution network of the city of Ouagadougou. To do this, water samples were taken from 28 boreholes during the high-water period. A mapping of the location of these boreholes was drawn up and the physico-chemical and microbiological parameters of the water samples were analysed. The results obtained show that 25% of the samples show nitrate ion pollution, 10% of the boreholes iron pollution. Also trace metal elements, aluminum (in excess in a single borehole, i.e. 3.57% of the samples), arsenic (in excess in two boreholes, i.e. 7.14% of the samples) and lead (in excess in seven boreholes, i.e. 25% of the samples), have been detected in some boreholes, sometimes exceeding the drinkability standards in force in Burkina Faso for drinking water. Microbiological analyses revealed the presence in 37% of the boreholes, thus reflecting contamination of these water points. The results of the Principal Component Analysis (PCA) on the major ions revealed a degree of mineralization, and a degree of pollution. These two gradients made it possible to group the boreholes into three categories: highly mineralized, moderately mineralized with nitrate pollution, and weakly mineralized. The Piper diagram showed that the calcium and magnesium bicarbonate facies is dominant (92.85% of the boreholes) ahead of the chloride/nitrate calcium and magnesium facies (7.14% of the boreholes). To reduce the health risks for consumers and improve water production, recommendations have been formulated.

Keywords:

Groundwater, borehole water, physicochemical characteristics, physicochemical characteristics, water quality, Ouagadougou.

Liste Des abréviations

°f	Degré français
2iE	Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
ACP	Analyse en composantes principales
DGAUE	Direction Générale de l'Assainissement des Eaux Usées et Excrétas
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
EDTA	Acide Ethylène Diamine Tétracétique
ETM	Eléments Traces Métalliques
mg/L	Milligramme par Litre
NTU	Unités Néphélométriques de Turbidité
OMD	Objectif de Milliaire pour le Développement
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
pH	Potentiel d'Hydrogène
PNAEPA	Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable
PNDES	Plan national de développement économique et social
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
TH	Titre Hydrotimétrique
UFC	Unité Formant Colonies
µg/L	Microgramme par Litre
µs/cm	Microsiemens par centimètre

Sommaire

DEDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME.....	III
ABSTRACT	IV
LISTE DES ABREVIATIONS	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1. GENERALITES SUR L'EAU POTABLE	3
1.1.1. Terminologie	3
1.1.1.1. Eau Potable	3
1.1.1.2. Eau souterraine	3
1.1.1.3. Forage	4
1.1.1.4. Aquifère	4
1.1.1.5. Nappe souterraine	5
1.1.2. Importance de l'eau	6
1.1.3. Importance de la surveillance des paramètres de qualités de l'eau potable	6
1.1.4. Les paramètres de surveillance de l'eau potable	7
1.1.4.1. Les paramètres organoleptiques	7
1.1.4.2. Les paramètres physico chimiques	8
1.1.4.3. Les paramètres microbiologiques	17
1.1.5. Relation entre la qualité des eaux souterraines et la géologie	20
1.1.6. Facteur de contamination des eaux souterraines	20
1.2. ACCES A L'EAU POTABLE AU BURKINA FASO	21
1.3. CADRE JURIDIQUE ET INSTITUTIONNEL ET REGLEMENTAIRE DE LA GESTION DE L'EAU POTABLE AU BURKINA FASO.....	22
1.3.1. Cadre juridique	22

1.3.2.	Cadre institutionnel	22
1.3.3.	Normes de qualités de l'eau potable au Burkina Faso	23
CHAPITRE 2. MATERIELS ET METHODES		25
2.1.	PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	25
2.1.1.	Situation Géographique	25
2.1.2.	Climat	26
2.1.3.	Hydrographie	26
2.1.4.	La géologie et l'hydrogéologie	28
2.2.	METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE	29
2.2.1.	Méthodologie de prélèvement	29
2.2.2.	Méthodologie d'analyses des échantillons	29
2.2.2.1.	Paramètres in situ	29
2.2.2.2.	Paramètres chimiques	29
2.2.2.3.	Paramètres microbiologiques	30
2.2.3.	Bilan ionique	31
2.2.4.	Méthodologie d'analyse de données	31
2.2.4.1.	Analyse statistique en composante (ACP) avec Rstudio	31
2.2.4.2.	Le faciès chimique avec le logiciel DAIGRAMME	32
CHAPITRE 3. RESULTATS ET DISCUSSION		33
3.1.	PRESENTATION DES POINTS DE PRELEVEMENTS	33
3.2.	RESULTATS DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES	33
3.2.1.	Résultats du Bilan Ionique	34
3.2.2.	Paramètres Physiques	34
3.2.3.	Paramètres Chimiques	37
3.2.4.	Éléments traces métalliques	44
3.3.	RESULTATS DES ANALYSES MICROBIOLOGIQUES	47
3.4.	CARTE DE POTABILITE	51
3.5.	CARACTERISATION DE LA VARIABILITE CHIMIQUE	52
3.5.1.	Analyse en Composantes Principales (ACP)	52
3.5.2.	Faciès chimique	54

CONCLUSION	57
RECOMMANDATIONS.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES	X

Liste des tableaux

Tableau I Caractéristique des éléments traces métalliques	44
Tableau II Résultats des analyses bactériologiques	48
Tableau III Les contaminations chimiques et bactériologiques des Différents forages.....	60

Liste des figures

Figure 1 Situation géographique de Ouagadougou	25
Figure 2 Réseau hydrographique dans la région du Centre	27
Figure 3: Cours d'eau associé au point d'eau dans la région du Centre.....	27
Figure 4 Géologie de la région du Centre	28
Figure 5 Localisation des différents forages de l'ONEA étudié	33
Figure 6 Tableau de décomposition des composantes	52
Figure 7 Cercle de corrélation des variables	52
Figure 8 Répartition des forages sur le plan factoriel F1*F2	53
Figure 9 Diagramme de piper avec les nitrates	55
Figure 10 Diagramme de piper sans les nitrates	55

Introduction

L'eau est un élément essentiel pour l'Homme et les êtres vivants en général. Ainsi, un approvisionnement adéquat en eau potable est important pour le développement socio-économique d'une localité (Mabrouki et al., 2016). Dans les pays en voie de développement, l'accès à l'eau potable demeure un obstacle majeur au développement. L'accès à une eau potable de qualité dans les grandes villes du tiers monde est un défi majeur du fait qu'il soit constamment menacé par la forte urbanisation, les activités humaines et le changement climatique (Dos Santos et Wayack Pambè 2016).

Au Burkina Faso, pays de l'Afrique de l'Ouest soumis à un climat de type soudano-sahélien, l'eau est un enjeu important pour les populations et pour les activités qui en sont tributaires. Depuis les années 1980, plusieurs programmes d'études, de campagnes et d'investigation à court et moyen termes ont donc été réalisés pour faire face au problème urgent de la gestion durable de l'eau. Comme l'accès à l'eau potable est un droit reconnu par la Constitution de 1991 du Burkina Faso, l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement (ONEA) a été créé afin de satisfaire les besoins de la population en matière d'eau potable. A cet effet, le Programme National d'approvisionnement en Eau Potable et d'assainissement (PNAEPA) a été adopté en 2006 comme instrument pour l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) en matière d'eaux potable et d'assainissement. L'article 63 ("LOI N° 022-2005/AN PORTANT CODE DE L'HYGIÈNE PUBLIQUE AU BURKINA FASO." 2005) a défini des normes nationales officielles de potabilisation de l'eau et leurs conditions d'application.

Dans la ville de Ouagadougou, l'ONEA, en plus des stations de productions d'eaux de consommation, exploite activement des puits de forage repartis dans diverses zones de la ville. Cela est dû aux fautes que la demande en eau devient de plus en plus croissante dépassant ainsi l'offre. Ainsi, ces eaux souterraines destinées à la consommation humaine ne doivent contenir ni substances chimiques dangereuses, ni microorganismes nocifs pour la santé (UE, 2015). La qualité de l'eau est déterminée par une série de paramètres physico-chimiques et microbiologiques (RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Des études antérieures ont montré que certains de ces paramètres dans les eaux de forage de Ouagadougou dépassent les limites recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé. D'après (OUANDAOGO 2008a), les activités anthropiques, telles que l'agriculture, l'urbanisation et l'industrialisation, peuvent contribuer à la contamination des nappes phréatiques. De plus, les pratiques d'exploitation des puits, la nature géologique du sous-sol et les interactions avec les eaux de surface peuvent également influencer la qualité des eaux de forage. Face à ces enjeux, il est primordial d'évaluer

de manière approfondie la qualité des eaux de forage exploitées par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou. C'est dans ce sens que s'inscrit notre étude, intitulée « Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux de forages exploitées par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou ». L'objectif général de cette étude est de contribuer à la compréhension de la situation actuelle de la qualité des eaux souterraines exploitées par l'ONEA à Ouagadougou. De façon spécifique, il s'agira de :

- ❖ Réaliser une caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux de forage
- ❖ Proposer d'amélioration et de protection de la qualité de l'eau dans les forages.

Chapitre 1. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Généralités sur l'eau Potable

1.1.1. Terminologie

1.1.1.1. *Eau Potable*

Selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'eau potable est définie comme "de l'eau qui satisfait aux normes de qualité de l'eau potable établies par les autorités nationales de santé, de manière à ce qu'elle puisse être consommée en toute sécurité par les êtres humains."

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) définit l'eau potable comme "de l'eau propre et sans danger pour la consommation humaine, sans risque pour la santé."

L'eau potable de base est définie comme une source d'eau potable fonctionnelle améliorée sur ou à proximité des locaux et des points d'eau accessibles à tous les utilisateurs pendant les heures de classe (UNESCO 2020). Une source d'eau potable améliorée est un point de distribution d'eau qui, par la nature de sa conception, protège l'eau de la contamination externe, en particulier d'origine fécale. Des exemples d'installations d'eau potable améliorées comprennent l'eau courante, les puits protégés, les puits tubulaires et les forages, les sources protégées et l'eau de pluie, l'eau en bouteille achetée et les camions-citernes. Les sources d'eau non améliorées comprennent les puits et les sources non protégés et les eaux de surface (par exemple les rivières, les lacs).

1.1.1.2. *Eau souterraine*

Une eau souterraine est de l'eau qui se trouve naturellement sous la surface terrestre, dans des formations géologiques appelées aquifères. Ces aquifères peuvent être situés à différentes profondeurs, allant de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres sous la surface. Il convient alors de distinguer deux types d'eau le sol que sont l'eau gravitaire et l'eau de rétention. (Loup 1965)

L'eau gravitaire provient généralement de précipitations qui s'infiltrent dans le sol et qui, en raison de la gravité, se déplacent vers le bas jusqu'à atteindre la zone saturée où tous les pores sont remplis d'eau. Elle circule seule dans les aquifères et aliment les ouvrages de captage et les sources.

L'eau de rétention est maintenue dans les vides à la surface des grains ou des parois de microfissures par des forces supérieures à celles de la gravité. Elle ne peut être extraite que sous dessiccation. Elle est donc pas mobilisable.

L'eau souterraine compose, avec le réservoir, les deux phases principales de l'aquifère. Vis-à-vis d'elle, le réservoir remplit les fonctions capacitives, de conductrices et d'échanges physico-chimiques. Suivant l'intervention des fonctions du réservoir en réponse à des incitations extérieures, le système dynamique qu'est l'aquifère présente trois comportements de types hydrodynamiques, hydro-chimique et hydro-biologique

1.1.1.3. Forage

Le forage est défini comme un ouvrage de petit diamètre destiné à capter des aquifères profonds. Il est équipé d'un tubage et d'une superstructure, et est prévu pour recevoir un dispositif de pompage. Quelques types de forage

- ❖ Forage sans tubage : en général, il est plus facile et moins onéreux de remplacer un forage sans tubage que de le réhabiliter.
- ❖ Forage avec tubage : par contre, pour les forages avec tubage, qui sont beaucoup plus chers à équiper et qui nécessitent l'utilisation d'équipement de forage, il est souvent préférable de réhabiliter.

1.1.1.4. Aquifère

Un aquifère est un corps (couche, massif) de roches ou de sols reposant sur une couche imperméable, appelée substratum ou mur, comportant une zone saturée suffisamment perméable pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine (Fouché 2013). Nous considérons comme « significatifs » des débits d'eau offrant des possibilités de mise en service des activités humaines (captage pour l'alimentation) ou d'interactions avec les travaux. Un aquifère peut comporter une zone non saturée dans le cas d'une nappe libre, zone à travers laquelle l'infiltration des eaux de pluie contribue à la recharge de la nappe.

L'aquifère est en général considéré comme homogène et continu quand il a une porosité et une perméabilité d'interstices, dite aussi de matrice : c'est le cas des roches sédimentaires meubles qui sont souvent des matériaux granulaires (sables, graviers) de forte perméabilité, mais aussi des roches sédimentaires cohérentes comme le calcaire ou la marne, de perméabilité plus faible. Cependant, il ne faut pas en conclure qu'un aquifère sédimentaire est forcément homogène ; un aquifère alluvial, par exemple, est souvent constitué de lentilles de roches meubles à la granulométrie contrastée (sable/argile). En revanche, l'aquifère est toujours considéré comme hétérogène quand il a, outre sa perméabilité de matrice, une perméabilité de fissures (granite) ou de conduits karstiques (calcaire). (Fouché 2013)

1.1.1.5. *Nappe souterraine*

Une nappe d'eau souterraine est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère dont toutes les parties sont en continuité hydraulique. Une nappe est une masse d'eau qui partage un volume avec la masse minérale solide : elle ne se conçoit bien que par abstraction. On isole par la pensée une « couche » d'eau occupant la porosité, limitée vers le haut, vers le bas et latéralement, qui imprègne un aquifère comme une éponge. L'idée peut se comparer avec une « nappe de brouillard » où l'espace est partagé entre l'eau et l'air. Il existe deux types de nappes selon la nature de la surface supérieure de la nappe à savoir les nappes libres et les nappes captives.(Fouché 2013)

❖ **Nappe libre**

Sous climat tempéré, pour un sol de porosité et perméabilité uniformes, l'eau s'infiltre dans la zone non saturée jusqu'à la surface libre. On appelle nappe libre, la masse d'eau contenue dans la porosité de la zone saturée, depuis la surface libre jusqu'à un substratum imperméable. Par opposition à une nappe captive, une nappe libre est une nappe dont la surface piézométrique coïncide avec la surface libre physique de la nappe.

Ainsi on distingue plusieurs types de nappes libre du point de vue morphologique :

-  Nappe littorale
-  Nappe alluviale
-  Nappe de vallée ou nappe soutenue
-  Nappe non soutenue ou nappe perchée

❖ **Nappe captive**

Une nappe est dite captive ou « en charge » si elle est limitée au toit par une formation très peu perméable et si la charge hydraulique de l'eau qu'elle contient est supérieure à la cote de son toit. Abaisser le niveau d'eau à la périphérie de la nappe abaissera la pression dans la zone centrale, mais ne la dénoiera pas : l'épaisseur saturée y restera la même. Ainsi, l'exploitation d'une nappe captive fait diminuer la pression d'eau qui règne en son sein mais ne réduit pas sa transmissivité. Quand on fore un puits ou un piézomètre dans une nappe captive, l'eau remonte brusquement dans l'ouvrage au moment où l'on crève le toit imperméable de la nappe. Si la pression est suffisante pour que l'eau remonte jusqu'à la surface du sol et jaillisse, autrement dit si la charge hydraulique est supérieure à la cote du sol, la nappe captive est dite artésienne ; le forage est artésien et jaillissant. Le comportement

artésien tend à s'atténuer au cours de l'exploitation et peut même disparaître à force de réduire la charge dans l'aquifère.

1.1.2. Importance de l'eau

D'après Albert Szent-Györgyi je cite "L'eau est la ressource la plus précieuse au monde. La vie humaine dépend de cela, mais il n'y en a pas assez."

En effet l'eau est d'une importance vitale pour la vie sur Terre. Elle joue un rôle essentiel dans de nombreux aspects de la vie humaine, de la santé à l'économie, en passant par l'environnement. Voici quelques-unes des raisons pour lesquelles l'eau est si importante :

- **Essentielle pour la vie humaine** : L'eau est essentielle pour l'hydratation et la survie humaine. Les êtres humains ne peuvent survivre que quelques jours sans eau.
- **Santé publique** : L'eau potable propre est cruciale pour prévenir les maladies liées à l'eau, telles que les infections gastro-intestinales. L'accès à une eau propre et sûre est donc essentiel pour la santé publique.
- **Agriculture** : L'eau est nécessaire à l'irrigation des cultures, ce qui permet de produire des aliments pour nourrir la population mondiale croissante.
- **Industrie** : De nombreuses industries dépendent de l'eau pour leurs processus de fabrication et de production.
- **Énergie** : L'eau est utilisée pour produire de l'électricité dans de nombreuses centrales électriques, y compris les centrales hydroélectriques.
- **Écosystèmes** : Les écosystèmes aquatiques, tels que les rivières, les lacs et les océans, abritent une biodiversité riche et jouent un rôle crucial dans la régulation du climat.
- **Transport** : L'eau est utilisée pour le transport de marchandises à l'échelle mondiale grâce au transport maritime.
- **Recréation** : Les activités de loisirs telles que la natation, la navigation de plaisance et la pêche dépendent de la disponibilité de l'eau.

1.1.3. Importance de la surveillance des paramètres de qualités de l'eau potable

La surveillance de la qualité de l'eau de boisson peut être définie comme « l'évaluation et l'examen permanents et vigilants sous l'angle de la sécurité sanitaire et de l'acceptabilité de l'eau de boisson » (Organisation mondiale de la Santé 2017).

La surveillance est une activité investigatrice visant à identifier et à évaluer les risques potentiels pour la santé associés à l'eau de boisson. La surveillance contribue à la protection de la santé publique en favorisant l'amélioration de la qualité, de l'accessibilité, de la couverture

(c'est-à-dire les populations disposant d'un accès fiable), de l'accessibilité économique et de la continuité des approvisionnements en eau de boisson (appelés « indicateurs de service »).

1.1.4. Les paramètres de surveillance de l'eau potable

La surveillance de la qualité de l'eau potable est un processus essentiel pour garantir que l'eau consommée par la population est sûre, propre et conforme aux normes de santé publique (Organisation mondiale de la Santé 2017). Cette surveillance repose sur la mesure et l'évaluation de divers paramètres qui permettent de déterminer la qualité globale de l'eau. Les paramètres de surveillance sont des indicateurs clés qui fournissent des informations sur la présence de contaminants, les caractéristiques physiques, chimiques et microbiologiques de l'eau, ainsi que sur sa potabilité (RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Dans cette section, nous passerons en revue les principaux paramètres que les organismes de réglementation et les autorités de santé publique surveillent régulièrement pour s'assurer que l'eau potable répond aux normes de sécurité et de qualité requises.

1.1.4.1. Les paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques de l'eau potable font référence à ses caractéristiques sensorielles qui peuvent être perçues par les sens. Ces paramètres sont importants car ils influent sur la perception de la qualité de l'eau par les consommateurs. Certaines substances préoccupantes pour la santé peuvent affecter ces paramètres, ce qui devrait normalement conduire au rejet de l'eau même à des concentrations bien inférieures à celles présentant un risque sanitaire. La tolérance à ces changements varie selon les individus et les facteurs locaux, tels que la qualité de l'eau habituellement consommée par la communauté, ainsi que des considérations sociales, environnementales et culturelles. (Organisation mondiale de la Santé 2017)

Les principaux paramètres organoleptiques sont :

- ❖ **La couleur** : La couleur de l'eau est surtout d'ordre organoleptique, c'est à dire capable de produire un effet sensoriel. Elle est influencée par la présence de matières organiques ou inorganiques dissoutes. Une eau colorée peut être perçue comme peu attrayante pour la consommation.
- ❖ **La limpidité** : La limpidité de l'eau se réfère à sa clarté visuelle. Une eau trouble peut être le signe de la présence de particules en suspension ou d'autres impuretés. En d'autres termes, elle dépend de la turbidité de l'eau

- ❖ **L'odeur** : L'odeur de l'eau peut être influencée par la présence de substances chimiques ou biologiques dissoutes. Une odeur désagréable peut être un signe de contamination.
- ❖ **Le goût** : Le goût de l'eau est influencé par la présence de substances dissoutes telles que les minéraux. Un goût anormal peut être un indicateur de contamination ou de déséquilibre chimique.

1.1.4.2. *Les paramètres physico chimiques*

La surveillance des paramètres physico-chimiques de l'eau potable est une composante essentielle de la garantie de sa qualité et de sa sécurité pour la consommation humaine. Ces paramètres permettent d'évaluer les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, jouant un rôle déterminant dans sa potabilité et son adéquation à divers usages. L'analyse de ces paramètres offre des informations cruciales pour comprendre la composition et la stabilité de l'eau. Cependant, il est important de noter que la plupart de ces paramètres ne présentent des préoccupations majeures qu'après une exposition sur une longue durée (Organisation mondiale de la Santé 2017).

Néanmoins, certains paramètres dangereux, susceptibles d'être présents dans l'eau de boisson, suscitent des inquiétudes motivées par les effets pouvant résulter de séries d'exposition de courte durée. Dans cette section, nous explorerons en détail les paramètres physico-chimiques clés qui sont régulièrement surveillés pour garantir la qualité de l'eau potable.

❖ **Le potentiel Hydrogène ou pH**

Le pH de l'eau est un paramètre essentiel qui influence non seulement la qualité chimique de l'eau, mais aussi son goût et son odeur. Le pH mesure l'acidité ou la basicité de l'eau sur une échelle de 0 à 14, où 7 est neutre, en dessous de 7 est acide, et au-dessus de 7 est basique. Du point de vue organoleptique, un pH extrême peut altérer le goût de l'eau. Une eau trop acide peut avoir un goût métallique ou être plus corrosive, ce qui peut endommager les infrastructures de distribution d'eau. À l'inverse, une eau trop basique peut avoir un goût amer ou savonneux, ce qui peut également être désagréable pour les consommateurs. Un pH optimal, généralement entre 6,5 et 8,5, est préférable pour assurer la qualité de l'eau potable du point de vue organoleptique et chimique. (Organisation mondiale de la Santé 2017; Bourrie 1976)

❖ **La turbidité**

La turbidité de l'eau est une mesure de la clarté de l'eau, influencée par la présence de particules en suspension telles que des boues, des sédiments ou des matières organiques. Sur le plan organoleptique, une eau turbide peut avoir un aspect trouble ou sale, ce qui peut être peu attrayant pour les consommateurs.(Organisation mondiale de la Santé 2017). Outre son aspect visuel, la turbidité peut également influencer le goût et l'odeur de l'eau en fournissant des surfaces où les bactéries et autres micro-organismes peuvent se développer. De plus, des particules en suspension peuvent adsorber des composés chimiques ou des contaminants, ce qui peut affecter le goût de l'eau. Du point de vue de la santé, une eau turbide peut être un indicateur de la présence de contaminants microbiens ou chimiques. Par conséquent, il est important de surveiller et de contrôler la turbidité de l'eau pour garantir sa qualité et sa sécurité pour la consommation humaine.(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). L'unité de mesure de la turbidité est Unité Néphélométrie de Turbidité (NTU)

❖ La conductivité électrique

La conductivité électrique de l'eau est une mesure de sa capacité à conduire un courant électrique. Elle est principalement influencée par la présence d'ions dissous dans l'eau, tels que les ions calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, carbonates et bicarbonates(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Du point de vue organoleptique, la conductivité n'a pas d'effet direct sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau. Cependant, la conductivité peut être un indicateur indirect de la qualité de l'eau, car une conductivité élevée peut indiquer une plus grande concentration en sels dissous. Une eau très minéralisée peut parfois avoir un goût ou une sensation en bouche particulière, mais cela dépend largement des sels présents et de leurs concentrations.(Organisation mondiale de la Santé 2017). En général, la conductivité élevée n'est pas souhaitable pour l'eau potable, car elle peut être associée à une augmentation de la dureté de l'eau et à d'autres problèmes de qualité. Son unité de mesure est le micron siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

❖ La dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)

La dureté de l'eau est une mesure de la concentration des ions calcium et magnésium dissous dans l'eau(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Une eau dure peut avoir un goût légèrement amer ou métallique, mais cette sensation n'est généralement pas très prononcée. La dureté peut également affecter la capacité de formation de mousse des détergents, ce qui peut être perceptible lors du lavage.(Bourrie 1976). Du point de vue de la santé, la dureté

de l'eau n'a généralement pas d'effet négatif sur les personnes, bien qu'une eau très dure puisse contribuer à l'accumulation de dépôts calcaires dans les appareils électroménagers et les canalisations. Une eau modérément dure est considérée comme acceptable pour la consommation humaine, mais la perception du goût peut varier d'une personne à l'autre. La dureté de l'eau est exprimée en termes de "degrés français" (°f) ou "milligramme par litres" (mg/L) de carbonate de calcium (CaCO_3).

❖ Le titre alcalimétrique complet (TAC) ou le titre Hydrogénocarbonates

Le titre alcalimétrique complet (TAC) de l'eau est une mesure de sa capacité à neutraliser les acides. Il est principalement déterminé par la présence de bicarbonates, de carbonates et d'hydroxydes dans l'eau. Le bicarbonate est généralement obtenu en dissolvant, d'une part, le dioxyde de carbone du sol issu de la minéralisation de la matière organique, et d'autre part, les carbonates du sol et des roches (calcaire, dolomite, etc.). Dans ces conditions, les concentrations en ions bicarbonate dépassent rarement 600 mg/L. En plus de ces valeurs, il faut également considérer la production in situ de dioxyde de carbone par fermentation du méthane, c'est-à-dire par contamination ou arrivée de magma profond ou de dioxyde de carbone métamorphique, permettant à l'eau d'éroder à nouveau sa croûte.(Canellas et Blavoux 1995)

Du point de vue organoleptique, le TAC n'a généralement pas d'effet direct sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau.(Organisation mondiale de la Santé 2017). Cependant, un TAC élevé peut avoir des implications pour la qualité de l'eau potable. Une eau avec un TAC élevé peut avoir un pH plus élevé, ce qui peut affecter le goût de l'eau en lui donnant un goût légèrement alcalin. De plus, un TAC élevé peut contribuer à la formation de dépôts calcaires dans les appareils électroménagers et les canalisations.(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Par contre une eau avec un TAC faible suggère une eau avec un pH bas d'où une agressivité de l'eau qui peut conduire à une corrosion des équipements d'exploitation du forage(Bourrie 1976). En résumé, bien que le TAC ne soit pas directement perceptible au goût, il peut avoir des implications pour la qualité de l'eau potable et son utilisation dans les foyers. Le TAC est exprimé en termes de "degrés français" (°f) ou "milligramme par litres" (mg/L) de bicarbonates (HCO_3).

❖ Le Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est un élément minéral présent naturellement dans l'eau. Le calcium associé à l'ion sulfate est fourni par la dissolution du gypse. Le calcium lié aux ions sulfate est fourni par la dissolution du gypse. Il est également dominant dans les eaux minérales circulant en milieu calcaire. Sa teneur est particulièrement élevée dans les eaux minérales gazeuses qui sont en contact avec des roches cristallines. (Canellas et Blavoux 1995). Il peut affecter le goût de l'eau en lui donnant une légère dureté ou une sensation en bouche spécifique. Une eau riche en calcium peut avoir un goût légèrement salé ou minéral, bien que cette sensation soit généralement faible et varie d'une personne à l'autre. En termes de qualité de l'eau, la présence de calcium n'est généralement pas un problème, sauf à des concentrations très élevées, ce qui peut contribuer à une dureté excessive de l'eau. Cependant, le calcium en lui-même n'a pas d'effets néfastes sur la santé humaine aux concentrations habituellement rencontrées dans l'eau potable. (Organisation mondiale de la Santé 2017). La recommandation limite du calcium de l'OMS est de 200 mg/L.

❖ **Le magnésium (Mg^{2+})**

Le magnésium est un autre élément minéral que l'on trouve souvent dans l'eau. Le magnésium est rarement le cation dominant et peut avoir plusieurs origines : soit des roches sédimentaires par dissolution de la dolomie (carbonate double de calcium et de magnésium) ou d'évaporites, soit des roches cristallines ou métamorphiques par hydrolyse des minéraux silicatés ferromagnésiens comme l'olivine ou les micas. Comme le calcium, le magnésium peut affecter le goût de l'eau en lui donnant une légère dureté ou une sensation en bouche spécifique. Une eau riche en magnésium peut avoir un goût légèrement amer ou métallique, bien que cette sensation soit généralement faible et varie d'une personne à l'autre (Organisation mondiale de la Santé 2017). Concernant la qualité de l'eau, la présence de magnésium n'est généralement pas un problème, sauf à des concentrations très élevées, ce qui peut contribuer à une dureté excessive de l'eau. Cependant, le magnésium en lui-même n'a pas d'effets néfastes sur la santé humaine aux concentrations habituellement rencontrées dans l'eau potable. (Organisation mondiale de la Santé 2017). L'OMS conseille une concentration de magnésium en dessous de 150 mg/L.

❖ **Le chlorure (Cl^-)**

Le chlorure est un anion présent naturellement dans l'eau, généralement associé à des cations tels que le sodium, le calcium ou le magnésium pour former des chlorures de sodium

(NaCl), de calcium (CaCl_2) ou de magnésium (MgCl_2). Ils sont présents dans les eaux souterraines des régions à volcanisme récent mais aussi dans les eaux très profondes du socle cristallin (Canellas et Blavoux 1995). Elle peut aussi provenir de l'infiltration des eaux agricoles ou des rejets des industries (« La suppression du chlorure de l'eau », s. d.). Du point de vue organoleptique, les chlorures n'ont généralement pas d'effet significatif sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau à des concentrations typiques. (Organisation mondiale de la Santé 2017). Sur le plan de la santé, les chlorures ne sont généralement pas nocifs pour la santé humaine aux concentrations habituellement rencontrées dans l'eau potable. Cependant, une exposition excessive aux chlorures peut avoir un effet laxatif et peut être préoccupante pour les personnes suivant un régime alimentaire pauvre en sel ou souffrant de certaines conditions médicales. (Organisation mondiale de la Santé 2017). Selon l'OMS, la concentration en chlorure dans une eau potable ne doit pas excéder 250 mg/L

❖ Le sodium (Na^+)

Le sodium est un élément que l'on trouve naturellement dans l'eau, bien que sa concentration varie considérablement selon la source qu'elle soit selon la géologie ou selon les activités anthropiques. Il est fourni d'une manière générale par le lessivage de dépôts sédimentaires. Il résulte aussi de l'hydrolyse des minéraux silicatés tels que les plagioclases et peut être abondant dans les eaux carbogazeuses de socle cristallin. Du point de vue organoleptique, une eau riche en sodium peut avoir un goût plus salé que l'eau potable typique, ce qui peut être perceptible pour certaines personnes. (Organisation mondiale de la Santé 2017). Sur le plan de la santé, le sodium est un élément important pour l'équilibre hydrique et électrolytique du corps. Cependant, une consommation excessive de sodium peut être nocive pour la santé, notamment en contribuant à l'hypertension artérielle et à d'autres problèmes de santé. (Organisation mondiale de la Santé 2017). En termes de qualité de l'eau potable, la présence de sodium n'est généralement pas un problème majeur si elle figure une concentration inférieure à 200 mg/L (Organisation mondiale de la Santé 2017)

❖ Le potassium (K^+)

Le potassium est un autre élément que l'on peut trouver naturellement dans l'eau, bien que sa présence soit généralement moins fréquente que celle du sodium. Il reste toujours un cation mineur et sa concentration ne devient significative que dans les eaux chlorurées très minéralisées en contact avec certaines évaporites (Canellas et Blavoux 1995). La présence

de concentrations très élevées de potassium dans l'eau peuvent être un signe de contamination spécifiques.(Olivier 2015).

Concernant la qualité de l'eau potable, la présence de potassium n'est généralement pas un problème pour la santé humaine aux concentrations habituellement rencontrées dans l'eau potable. La recommandation de l'OMS exige une concentration en potassium inférieur à 12 mg/L

❖ Le Nitrate (NO_3^-)

Les nitrates sont des composés chimiques contenant l'ion nitrate (NO_3^-). Ils sont souvent présents dans l'eau en raison de l'utilisation d'engrais agricoles, du ruissellement des eaux de surface et de la contamination des eaux souterraines par les activités humaines. Du point de vue organoleptique, les nitrates n'ont généralement pas d'effet significatif sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau à des concentrations typiques.(Organisation mondiale de la Santé 2017)

Cependant, les nitrates peuvent poser des problèmes de santé s'ils sont présents à des concentrations élevées dans l'eau potable. Une exposition excessive aux nitrates peut entraîner une condition appelée méthémoglobinémie, ou "maladie bleue", qui affecte la capacité du sang à transporter l'oxygène. Cette condition est particulièrement préoccupante chez les nourrissons et peut être mortelle si elle n'est pas traitée rapidement.(Awomeso 1990a)

Les normes de qualité de l'eau varient d'un pays à l'autre mais l'OMS recommande une limite de concentration à 50 mg/L.

❖ Les nitrites (NO_2^-)

Les nitrites sont des composés chimiques contenant l'ion nitrite (NO_2^-). Ils peuvent être présents dans l'eau en raison de la décomposition des nitrates ou de la contamination par des activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie et le traitement des eaux usées. Du point de vue organoleptique, les nitrites peuvent donner à l'eau un goût et une odeur désagréables, notamment un goût métallique ou de chlore.(Organisation mondiale de la Santé 2017)

Les nitrites peuvent poser des risques pour la santé humaine s'ils sont présents à des concentrations élevées dans l'eau potable. Une exposition excessive aux nitrites peut entraîner des problèmes de santé tels que la méthémoglobinémie, ou "maladie bleue", qui affecte la capacité du sang à transporter l'oxygène. Les nourrissons sont particulièrement

sensibles aux effets des nitrites et peuvent développer la maladie bleue si l'eau qu'ils consomment est contaminée.(Awomeso 1990). Les directives de l'OMS recommandent une concentration en dessous de 0,1 mg/L afin d'éviter les risques sur la santé public.

❖ **Le sulfate (SO_4^{2-})**

Le sulfate est un anion composé d'un atome de soufre et de quatre atomes d'oxygène (SO_4^{2-}). Dans l'eau, il est généralement associé à des cations tels que le sodium, le calcium ou le magnésium pour former des sulfates de sodium (Na_2SO_4), de calcium (CaSO_4) ou de magnésium (MgSO_4). Les eaux souterraines tirent leur sulfate du lessivage des formations géologiques contenant du gypse et aussi de l'oxydation des sulfures, sulfures métalliques (pyrite) abondants dans certaines roches ou sulfures accompagnant le volcanisme.(Canellas et Blavoux 1995). Les sulfates n'ont généralement pas d'effet significatif sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau à des concentrations typiques. Les ions sulfates sont peu toxiques à des doses comprises entre 100 mg/l et 200 mg/l et ont un léger effet purgatif chez certains adultes.(Organisation mondiale de la Santé 2017). L'OMS recommande une concentration en Sulfate inférieur à 250 mg/L

❖ **Le Ortho-phosphate (PO_4^{3-})**

Le phosphate est un composé chimique qui peut être présent naturellement dans le sol mais leur principale source dans les eaux souterraines sont les activités agricoles (lessivage et infiltration)(Sawadogo et al. 2023). Du point de vue organoleptique, des teneurs élevées en phosphates peuvent contribuer aux problèmes de turbidité liés au verdissement des eaux.(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009; Organisation mondiale de la Santé 2017) Le limite de concentration à ne pas dépasser recommandé par l'OMS est de 12 mg/L.

❖ **Le Fer Total (Fe)**

Le fer total dans l'eau représente la somme de tout le fer présent sous forme dissoute ou particulaire. C'est un élément assez abondant dans les roches sous forme de silicates, d'oxydes et hydroxydes, de carbonates et de sulfures. La présence de fer dans l'eau peut favoriser la prolifération de certaines souches de bactéries qui précipitent le fer ou corrodent les canalisations(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Du point de vue organoleptique, des concentrations élevées de fer peuvent donner à l'eau un goût métallique, ce qui peut être désagréable pour les consommateurs. Sur le plan de la santé, le fer est un élément essentiel

pour le corps humain, mais une exposition excessive peut être nocive. L'ingestion régulière d'eau contenant des concentrations élevées de fer peut entraîner des problèmes de santé tels que des troubles gastro-intestinaux et des dommages aux organes internes.(Loup 1965; Organisation mondiale de la Santé 2017). L'OMS préconise une concentration en fer total inférieur à 0,3 mg/L

❖ **Les Fluorures (F^-)**

Le fluor est un élément chimique présent naturellement dans l'eau, généralement sous forme d'ions fluorure (F^-). La présence des fluorures dans les eaux souterraines tiennent leur source des roches sédimentaire. Du point de vue organoleptique, le fluor n'a généralement pas d'effet significatif sur le goût, l'odeur ou l'apparence de l'eau à des concentrations typiques. Le fluor est un élément important pour la santé dentaire, car il peut aider à prévenir la carie dentaire lorsqu'il est présent à des concentrations appropriées dans l'eau potable. Cependant, une exposition excessive au fluor peut entraîner des problèmes de santé tels que la fluorose dentaire et des problèmes osseux.(Organisation mondiale de la Santé 2017). Sa teneur ne doit pas excéder 1,5 mg/l(Organisation mondiale de la Santé 2017)

❖ **Les éléments traces métalliques**

➤ **L'argent (Ag)**

L'argent est présent naturellement dans les eaux souterraines car elle se trouve dans certains minéraux qui par des processus d'altération se libère dans l'eau. Les composés d'argent peuvent également se trouver dans le sol, notamment sous forme de minéraux sulfurés. Ils peuvent également se retrouver dans les eaux souterraines en raison de l'infiltration des eaux de ruissellement.(DESBORDES 2000)

➤ **L'aluminium (Al)**

Métal léger, blanc et brillant, il ne s'altère pas à l'air grâce à la formation d'une couche protectrice d'alumine. En solution acide, il se présente sous la forme Al^{3+} . Lorsque le pH de la solution augmente progressivement, il précipite sous forme de tri-hydroxyde $Al(OH)_3$, qui peut ensuite se dissoudre sous forme d'aluminate AlO_2^- .(DESBORDES 2000)

➤ **L'arsenic (As)**

Cet élément non métallique est largement répandu dans la biosphère : les roches ignées en contiennent entre 1 et 9 mg/kg, et les phosphates naturels environ 20 mg/kg. Il se présente sous forme de sulfures, tels que le réalgar (As_2S_2) ou l'orpiment (As_2S_3). Sa

présence dans l'environnement, et par conséquent dans l'eau, est liée à diverses sources de pollution, notamment les rejets d'eaux résiduaires industrielles, le traitement de minerais arsenicaux (cuivre), la combustion de charbon ou de déchets, ainsi que l'utilisation d'engrais phosphatés, d'herbicides, d'insecticides et de détergents.(RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009)

➤ **Le cadmium (Cd)**

Dans la nature, le cadmium est généralement présent avec le zinc. Les eaux contiennent habituellement seulement quelques microgrammes de cadmium par litre, avec une limite de 3 µg/L(Organisation mondiale de la Santé 2017). Lorsque des niveaux élevés de cadmium sont détectés dans les eaux souterraines, la source doit souvent être recherchée dans les effluents industriels, en particulier ceux de la galvanoplastie. Le cadmium peut également être transporté par les pluies à partir des émissions industrielles. En outre, la présence de cadmium comme contaminant dans les engrais et les boues des stations d'épuration utilisées en agriculture peut contribuer à la pollution des aquifères.(Olivier 2015)

➤ **Le nickel (Ni)**

Dans les pollutions d'origine industrielle, le nickel est généralement associé aux cyanures, au mercure, à l'arsenic, au chrome, etc. Le fait que le nickel ne soit généralement pas retrouvé dans les eaux souterraines, ou seulement en quantités très faibles, indique que la présence de ce métal est principalement liée aux activités humaines. Le nickel peut également provoquer des corrosions dans les circuits de distribution d'eau potable.(DESBORDES 2000)

➤ **Le manganèse (Mn)**

Les sources les plus fréquentes de manganèse dans l'eau souterraine sont naturelles ; il peut s'agir par exemple de l'altération météorique des minéraux et des roches qui en contiennent, comme les amphiboles, les micas ferromagnésiennes, les sulfures de fer, les magnétites, les oxydes, les carbonates, ainsi que les minéraux d'argile ferrugineuse. Les sources artificielles sont les suivantes : cuvelage des puits, canalisations, pompes, réservoirs, et autres objets faits en fonte ou en acier pouvant être en contact avec de l'eau. Les effluents industriels, les eaux d'exhaure acide, les eaux usées ainsi que les lixiviats provenant des sites d'enfouissement des déchets peuvent également contribuer à la présence de fer et de manganèse dans les nappes phréatiques.(Organisation mondiale de la Santé 2017)

➤ **Le cuivre (Cu)**

Dans la nature, le cuivre se trouve sous forme de minerais natifs, oxydés ou sulfurés. Il peut être présent dans certaines eaux à des concentrations inférieures à 1 mg/L, sous forme ionique ou en complexes (cyanures, ammoniacale, composés organiques, etc.). En dehors des pollutions industrielles et des traitements agricoles, ce métal provient principalement de la corrosion des tuyauteries de distribution, avec des concentrations généralement comprises entre (0,5 et 1 mg/L.).(DESBORDES 2000)

➤ **Le zinc (Zn)**

Dans l'eau, les chlorures et sulfates de zinc sont hautement solubles, et leur hydrolyse entraîne une baisse du pH. En présence d'un excès d'hydrogénocarbonate, la solubilité du zinc est principalement déterminée par la solubilité du carbonate, qui est assez élevée, et de l'hydroxyde, qui est moins soluble. Le zinc trouvé dans les eaux de distribution, à des concentrations parfois supérieures à 1 mg/L, provient souvent des canalisations en laiton ou en fer galvanisé, qui sont attaquées par des eaux agressives ou riches en chlorures et sulfates.(Olivier 2015; DESBORDES 2000)

➤ **Le chrome (Cr)**

Le chrome est présent en petite quantité dans la nature et se trouve principalement dans les roches basiques, par opposition aux roches siliceuses. Sa solubilité est faible, ce qui le rend peu sujet au lessivage du sol. Il est amphotère et peut adopter différentes formes dans l'eau, principalement sous forme de cation dans les eaux naturelles à pH acide. Sa présence dans l'eau est liée aux rejets des ateliers de galvanoplastie. L'oxydation des composés de chrome est instantanée, ce qui signifie que le chrome peut se trouver sous forme trivalente (chromites) ou hexavalente (chromates et dichromates).(DESBORDES 2000; Organisation mondiale de la Santé 2017)

➤ **Le plomb (Pb)**

Le plomb peut se trouver sous forme de divers composés naturels, tels que des carbonates (cérusites), des phosphates (pyrophosphites), mais principalement des sulfures (galène). Bien que le sulfure de plomb soit peu soluble, il peut être transformé en hydroxyde ou en carbonate après avoir été oxydé en sulfate.(Organisation mondiale de la Santé 2017)

1.1.4.3. Les paramètres microbiologiques

La contamination microbiologique de l'eau potable est une préoccupation majeure en raison de ses conséquences potentielles sur la santé publique. Il est impératif de maintenir un contrôle

constant de la contamination microbienne et de ne jamais la laisser dépasser les limites recommandées. Les organismes microbiologiques indicatifs jouent un rôle crucial dans divers aspects de la surveillance de la qualité de l'eau potable. Ils sont utilisés pour détecter la contamination fécale, évaluer l'efficacité des procédés de traitement tels que la filtration ou la désinfection, et garantir l'intégrité et la propreté des réseaux de distribution.

Dans le cadre de la surveillance de la qualité des eaux de forages, les organismes types recherchés sont les bactéries coliformes totaux, les bactéries coliformes thermotolérants et *Escherichia coli*. Ces indicateurs microbiologiques jouent un rôle essentiel dans l'évaluation de la sécurité de l'eau de forage et dans la protection de la santé publique.

❖ Les germes totaux (GT)

Les germes totaux sont une mesure générale de la présence de microorganismes dans l'eau. Ce paramètre comprend une variété de microorganismes, y compris des bactéries, des virus, des champignons et des protozoaires. La présence de germes totaux dans l'eau peut indiquer une contamination microbiologique et peut être utilisée comme indicateur de la qualité microbiologique globale de l'eau.(Organisation mondiale de la Santé 2017). La détection de germes totaux dans l'eau peut être préoccupante car elle suggère la présence de divers microorganismes qui peuvent potentiellement causer des maladies chez l'homme. Cependant, les germes totaux ne permettent pas d'identifier spécifiquement les types de microorganismes présents, ce qui nécessite généralement des tests plus spécifiques pour évaluer les risques pour la santé humaine.(Belghiti et al. 2013)

❖ Les bactéries coliformes totaux (CT)

Les coliformes totaux sont des bactéries indicatrices utilisées pour évaluer la qualité microbiologique de l'eau. Leur présence dans l'eau peut indiquer une contamination fécale et potentiellement la présence d'autres microorganismes pathogènes. Les coliformes totaux comprennent un groupe de bactéries présentes dans l'intestin des mammifères, y compris les humains, ainsi que dans l'environnement.(Organisation mondiale de la Santé 2017). En termes de santé publique, la présence de coliformes totaux dans l'eau peut indiquer un risque de maladies d'origine hydrique. Cependant, il est important de noter que les coliformes totaux ne sont pas tous des pathogènes et ne causent pas nécessairement de maladies. Leur présence sert principalement d'indicateur de la qualité microbiologique de l'eau et peut nécessiter des analyses plus poussées pour identifier les pathogènes spécifiques.(Olivier

2015). Les normes de qualité de l'eau potable fixent généralement des limites pour les coliformes totaux pour garantir que l'eau est sûre à boire. La détection de coliformes totaux dans l'eau peut nécessiter des mesures correctives telles que le traitement de l'eau ou la recherche de sources de contamination pour prévenir les risques pour la santé publique.

❖ **Les bactéries coliformes thermotolérants ou fécaux (CF)**

Les coliformes fécaux sont une sous-catégorie de coliformes qui proviennent spécifiquement des intestins des mammifères à sang chaud, y compris les humains, et qui se retrouvent dans leurs matières fécales. Ils sont capables de se développer à 44,5°C, alors que les autres coliformes que l'on trouve dans les milieux naturels ne peuvent pas se développer à cette température élevée. Leur présence dans l'eau est généralement considérée comme un indicateur de contamination fécale et peut être associée à la présence d'autres pathogènes d'origine fécale dans l'eau. (Organisation mondiale de la Santé 2017). La détection de coliformes fécaux dans l'eau peut être préoccupante car elle suggère une contamination directe ou indirecte par des matières fécales humaines ou animales. Cela peut augmenter le risque de maladies d'origine hydrique telles que la gastro-entérite, la typhoïde, la dysenterie et d'autres infections gastro-intestinales.

❖ ***Escherichia coli***

Escherichia coli (*E. coli*) est une bactérie présente dans les intestins des mammifères, y compris les humains. Cependant, certaines souches d'*E. coli* peuvent causer des maladies chez l'homme, notamment des infections urinaires, des infections intestinales et des infections sévères telles que la septicémie. (Awomeso 1990b). Les normes de qualité de l'eau potable établissent des limites strictes pour la présence d'*E. coli* dans l'eau potable, et sa détection nécessite généralement des mesures correctives immédiates pour assurer la sécurité de l'eau. Ces mesures peuvent inclure des traitements de désinfection de l'eau, des enquêtes pour identifier la source de contamination et des mesures pour empêcher la contamination future.

❖ **Les streptocoques fécaux (SF)**

Les streptocoques fécaux sont des bactéries du genre *Streptococcus* qui sont présentes dans les intestins des mammifères à sang chaud, y compris les humains, et qui sont excrétées dans les matières fécales. Ils témoignent d'une contamination d'origine fécale

ancienne (Organisation mondiale de la Santé 2017). Les streptocoques fécaux sont souvent utilisés comme indicateurs de contamination fécale dans l'eau, car leur présence peut être plus persistante que celle d'autres indicateurs tels que les coliformes. Ils sont nettement plus résistants à l'action des désinfectants, notamment le chlore, que certains germes pathogènes. (MOUSSA NOMAO 2017)

1.1.5. Relation entre la qualité des eaux souterraines et la géologie

La qualité des eaux souterraines est étroitement liée à la géologie des régions où elles se trouvent. La composition géologique du sous-sol influence directement la composition chimique de l'eau souterraine. En effet, les eaux souterraines peuvent dissoudre des minéraux présents dans les roches traversées, ce qui peut affecter leur composition en éléments majeurs et mineurs. Par exemple, la présence de roches calcaires peut entraîner une concentration élevée en calcium et en bicarbonates dans l'eau souterraine. (SECK 1997)

De plus, la géologie influence également la perméabilité du sous-sol, c'est-à-dire sa capacité à permettre le passage de l'eau. Les aquifères formés dans des roches perméables peuvent être plus vulnérables à la contamination, car l'eau peut circuler plus facilement à travers ces formations et transporter des polluants provenant de la surface. (SECK 1997)

Dans le cas de Ouagadougou, la géologie de la région est caractérisée par la présence de formations géologiques variées, notamment des formations cristallines, des grès et des argiles. Ces différentes formations peuvent avoir des caractéristiques hydrogéologiques distinctes, ce qui peut influencer la qualité des eaux souterraines prélevées dans les forages de la ville. (OUANDAOGO 2008a)

Il est donc essentiel de prendre en compte la géologie locale lors de l'évaluation de la qualité des eaux souterraines à Ouagadougou, car elle peut fournir des indications importantes sur les sources potentielles de contamination et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Une meilleure compréhension de cette relation permettra une gestion plus efficace et durable des ressources en eau souterraine de la région.

1.1.6. Facteur de contamination des eaux souterraines

Les eaux souterraines de Ouagadougou, comme dans de nombreuses autres villes, peuvent être contaminées par divers facteurs. Voici quelques-uns des principaux facteurs de contamination des eaux souterraines à Ouagadougou :

- ❖ **Activités humaines** : Les activités humaines telles que l'agriculture, l'élevage, l'industrie et l'urbanisation peuvent entraîner des contaminations des eaux souterraines. Les pesticides, les engrais, les produits chimiques industriels et les déchets urbains peuvent contaminer les eaux souterraines par lessivage et infiltration.
- ❖ **Déchets solides** : La gestion inadéquate des déchets solides, tels que les décharges sauvages et les sites d'enfouissement non contrôlés, peut entraîner des contaminations des eaux souterraines par infiltration des lixiviats.
- ❖ **Assainissement** : Les systèmes d'assainissement inadéquats, tels que les fosses septiques non étanches, les réseaux d'égouts défectueux et les rejets directs des eaux usées, peuvent contaminer les eaux souterraines par infiltration.
- ❖ **Activités industrielles** : Les industries peuvent être une source importante de contamination des eaux souterraines en raison de l'utilisation et du rejet de produits chimiques et de substances toxiques.
- ❖ **Agriculture** : L'utilisation excessive d'engrais et de pesticides en agriculture peut entraîner des contaminations des eaux souterraines par lessivage et infiltration.
- ❖ **Gestion des produits chimiques** : La mauvaise gestion des produits chimiques, tels que le stockage inapproprié et les déversements accidentels, peut entraîner des contaminations des eaux souterraines.

1.2. Accès à l'eau potable au Burkina Faso

Au Burkina Faso, l'accès à l'eau potable reste un défi majeur malgré les efforts déployés par le gouvernement et les partenaires internationaux pour améliorer la situation. Selon les données de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et de l'UNICEF, seulement environ 60% de la population burkinabè avait accès à une source d'eau potable en 2019.

Les zones rurales sont particulièrement touchées par le manque d'accès à l'eau potable, avec seulement 45% de la population rurale ayant accès à une source d'eau potable en 2019, contre 89% en milieu urbain. Les femmes et les enfants sont souvent chargés de la collecte de l'eau, ce qui peut entraîner des déplacements longs et fatigants, en plus d'exposer les populations à des maladies liées à l'eau (Ministère de l'Eau et de l'Assainissement 2020).

Le gouvernement burkinabè a mis en place plusieurs programmes et politiques visant à améliorer l'accès à l'eau potable, notamment le Plan national de développement économique et social (PNDES) et le Programme national d'accès universel à l'eau potable et à l'assainissement (PNAEPA). Ces initiatives visent à renforcer les infrastructures hydrauliques, à promouvoir l'hygiène et à sensibiliser les populations à l'importance de l'eau potable pour la santé.

Malgré ces efforts, des défis persistent, notamment en matière de financement, de maintenance des infrastructures et de gouvernance. L'amélioration de l'accès à l'eau potable au Burkina Faso nécessite une approche holistique et une collaboration étroite entre le gouvernement, les organisations internationales, la société civile et le secteur privé.

1.3. Cadre juridique et institutionnel et réglementaire de la gestion de l'eau potable au Burkina Faso

1.3.1. Cadre juridique

Le Burkina Faso dispose d'un cadre juridique spécifique régissant la gestion de l'eau potable, comprenant des lois, des décrets et des arrêtés visant à assurer la disponibilité, l'accessibilité et la qualité de l'eau pour tous les citoyens. Parmi les textes juridiques importants figurent :

- ✚ La Loi n° 010-2001/AN du 04 mai 2001 portant Code de l'Eau au Burkina Faso, qui définit les principes généraux de la politique de l'eau, les droits et obligations des usagers, ainsi que les modalités de gestion des ressources en eau.
- ✚ Le Décret n° 2013-325/PRES/PM/MEEVCC du 29 mai 2013 portant modalités d'application de la loi n° 010-2001/AN du 04 mai 2001 portant Code de l'Eau au Burkina Faso, qui précise les modalités pratiques de mise en œuvre de la loi sur le terrain.
- ✚ L'arrêté conjoint N°00019/MAHRH/MS du 05/04/2005 portant définition des normes nationales de potabilité de l'eau au Burkina Faso
- ✚ L'Arrêté interministériel n° 2013-009/MEEVCC/MESSRS du 10 avril 2013 portant délimitation des zones de protection des points d'eau potable, qui vise à protéger les sources d'eau potable contre la pollution et les activités humaines nuisibles.

Ces textes juridiques définissent les droits et les responsabilités des différents acteurs impliqués dans la gestion de l'eau potable, y compris l'État, les collectivités locales, les utilisateurs et les prestataires de services. Ils établissent également les normes de qualité de l'eau potable et les procédures de contrôle et de suivi de sa qualité.

Le cadre juridique de la gestion de l'eau potable au Burkina Faso est en constante évolution pour répondre aux défis actuels liés à l'accès à l'eau potable, à la préservation des ressources en eau et à la gestion durable de ces ressources.

1.3.2. Cadre institutionnel

La gestion de l'eau potable au Burkina Faso est encadrée par un cadre institutionnel qui comprend plusieurs acteurs clés chargés de la régulation, de la gestion et de la fourniture de

l'eau potable dans le pays. Les principaux organes et institutions impliqués dans la gestion de l'eau potable au Burkina Faso sont les suivants :

- ✚ **Ministère en charge de l'eau** : Le ministère en charge de l'eau est l'organe principal chargé de la formulation et de la mise en œuvre des politiques nationales en matière de gestion de l'eau potable. Il est responsable de la coordination des différentes interventions dans le secteur de l'eau à travers deux directions centrales : la DGRE (Direction Générale des Ressources en Eau) et la DGAEUE (Direction Générale de l'assainissement, des Eaux Usées et Excrétas), responsables du pilotage du PN AEPA à l'intérieur du pays.
- ✚ **ONEA (Office National de l'Eau et de l'Assainissement)** : L'ONEA est l'organisme public chargé de la production, de la distribution et de la gestion de l'eau potable dans les centres urbains du Burkina Faso. Il opère sous la tutelle du ministère en charge de l'eau et assure également des missions de contrôle et de régulation du secteur.
- ✚ **Services décentralisés** : Au niveau local, la gestion de l'eau potable est assurée par les collectivités territoriales et les services déconcentrés de l'État, qui sont responsables de la gestion des infrastructures et des services d'eau potable dans leurs juridictions respectives.
- ✚ **ONG et associations locales** : En plus des institutions gouvernementales, de nombreuses organisations non gouvernementales (ONG) et associations locales œuvrent dans le secteur de l'eau potable au Burkina Faso. Elles jouent un rôle important dans la sensibilisation, l'éducation et la mobilisation communautaire pour l'amélioration de l'accès à l'eau potable.

Ce cadre institutionnel, bien que diversifié, est confronté à des défis tels que le manque de financement, les contraintes techniques et la gouvernance du secteur. Cependant, il constitue une base essentielle pour la gestion efficace et durable de l'eau potable au Burkina Faso.

1.3.3. Normes de qualités de l'eau potable au Burkina Faso

Conformément à l'arrêté conjoint N°00019/MAHRH/MS du 05/04/2005 portant définition des normes nationales de potabilité de l'eau au Burkina Faso, l'article 2 nous révèle que : « Dans l'attente de l'élaboration de normes nationales tenant compte des spécifications hydro chimiques et des moyens disponibles pour les analyses de potabilité, les normes qui devront être respectées au Burkina Faso sont celles de l'OMS éditées dans volume 1 " Recommandations des directives de qualité pour l'eau de boisson " deuxième édition, Genève 1996 ». Ainsi, les normes de qualité

de l'eau potable du Burkina sont conformes aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Voici les principales normes de qualité de l'eau potable au Burkina Faso : Ces normes sont régulièrement surveillées et contrôlées par l'ONEA pour assurer la qualité de l'eau potable distribuée au Burkina Faso.

Chapitre 2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

2.1.1. Situation Géographique

L'étude a été effectuée au Burkina Faso dans la ville de Ouagadougou. Sa localisation géographique est située entre les parallèles 12°30' et 12°25' de latitude nord et les méridiens 1°27 et 1°35 de longitude Ouest. Vue l'expansion rapide de la taille de Ouagadougou à cause de la croissance démographique, ses limites couvrent peu à peu le territoire des communes voisines. On parle maintenant du grand Ouaga qui est une entité territoriale qui couvre initialement l'espace géographique formé par la commune urbaine de Ouagadougou avec sept (07) communes rurales périphériques que sont : Komki-Ipala, Komsilga, Koubri, Loumbila, Saaba et Tanghin Dassouri. Les citoyens vivent désormais à l'échelle de ce grand territoire. Le grand Ouaga a une superficie d'environ 3304 km². En 2006, sa population était estimée à 1 754 706 Habitant avec un taux annuel d'accroissement moyen de 4,78%. Le recensement général de 2019 estime la population du grand Ouaga à plus de 3,5 millions d'habitants.

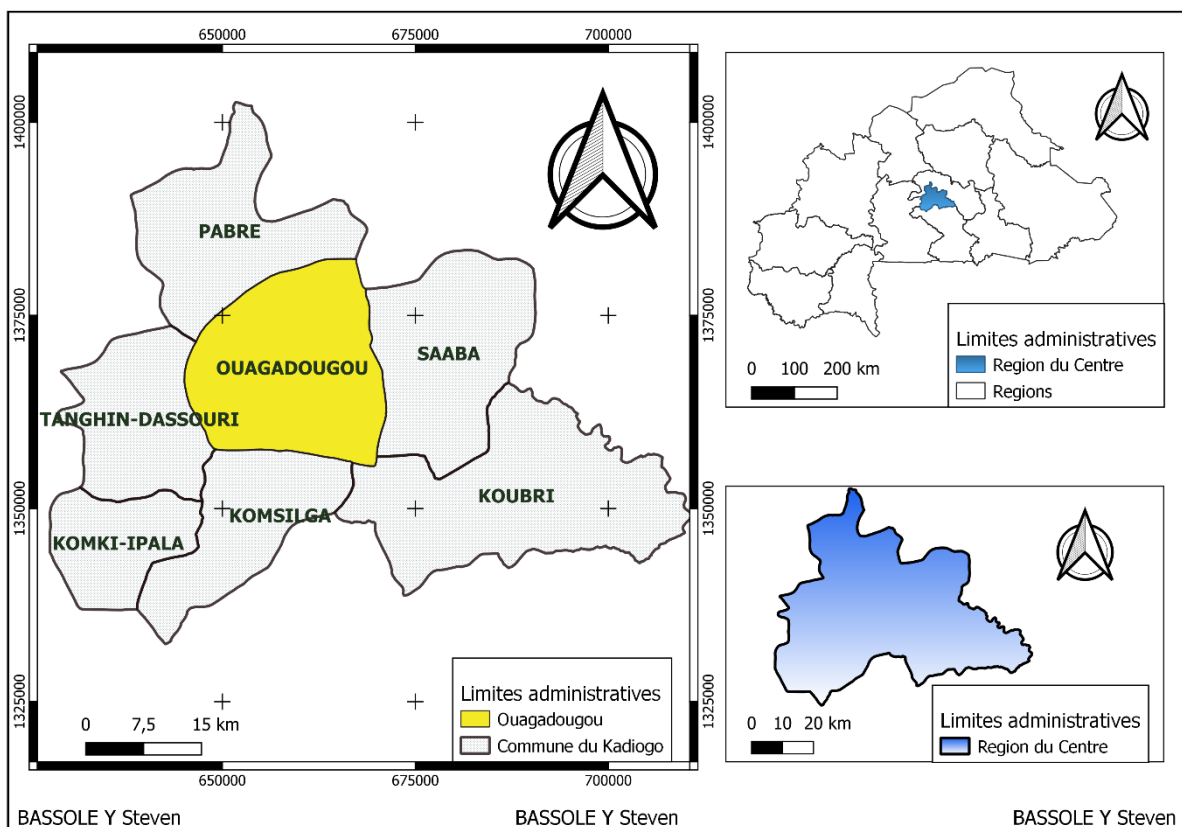


Figure 1 Situation géographique de Ouagadougou

2.1.2. Climat

La ville est située dans une région caractérisée par un climat tropical de savane, marqué par deux saisons distinctes : la saison sèche et la saison des pluies. Cette dualité saisonnière influe grandement sur la vie quotidienne des habitants, les activités agricoles, ainsi que la gestion des ressources en eau. La saison sèche à Ouagadougou s'étend de novembre à avril. Durant cette période, les températures sont extrêmement élevées, atteignant souvent plus de 35°C. En revanche, la saison des pluies s'étend de mai à octobre. Les températures deviennent plus modérées, oscillant généralement entre 25°C et 30°C, avec une humidité nettement plus élevée. Les pluies sont fréquentes et abondantes, surtout entre juin et septembre, avec un pic en août. Les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à environ 800 mm, principalement concentrées sur quelques mois.(Karambiri et Gansaonre 2023)

2.1.3. Hydrographie

La commune de Ouagadougou est située dans le bassin versant du Massili et drainée par un réseau hydrographique moyennement dense. Elle est traversée par quatre cours d'eau aménagés en partie en canaux qui se jettent dans le Massili supérieur en sa rive droite. Il s'agit du cours d'eau central (ou de Paspanga), de celui de Zogona, du Mogho Naaba et du cours d'eau de Wemtenga ou de Dassasgho. Les écoulements du Massili supérieur sont ralentis au nord de la ville par une plaine d'inondation sur laquelle sont construites les trois principales retenues d'eau de la ville avec une capacité de rétention cumulée de 5 235 500 m³. Ouagadougou compte au total quatre (4) barrages intra urbains dont trois (3) participent à l'alimentation en eau potable de la ville. Les risques d'inondation, à l'instar de celle de septembre 2009, sont énormes pour les populations résidant dans des zones inondables lors des fortes pluies.(HIE 2009)

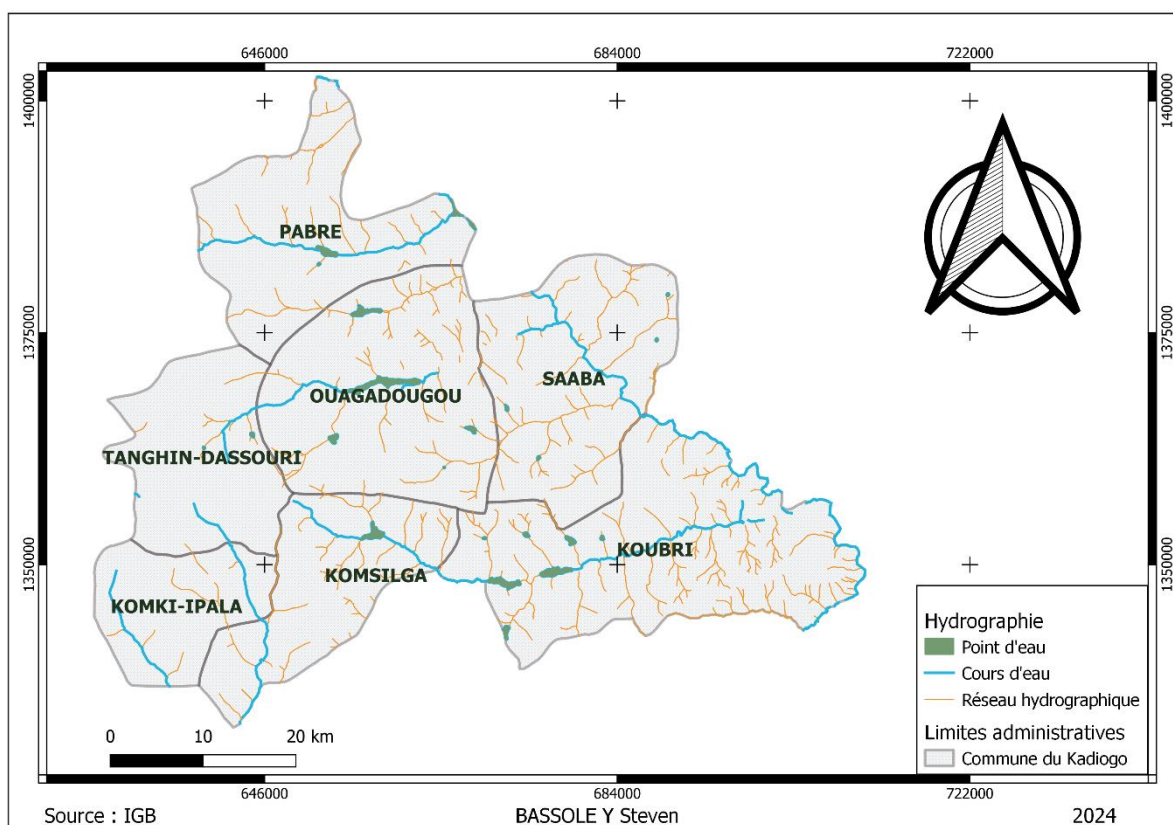


Figure 2 Réseau hydrographique dans la région du Centre

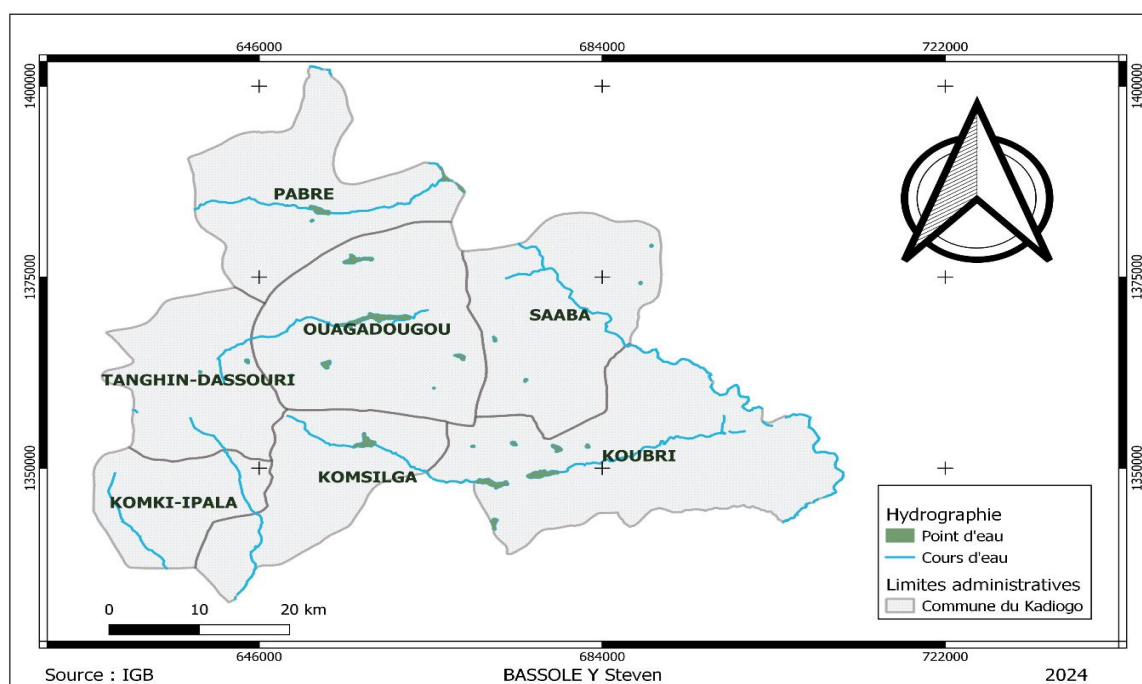


Figure 3: Cours d'eau associé au point d'eau dans la région du Centre

2.1.4. La géologie et l'hydrogéologie

La ville de Ouagadougou est située sur un socle cristallin précambrien constitué de granites très hétérogènes et de la tonalite. Le socle n'affleure que par des pointements de petites dimensions au nord-ouest et à l'ouest de la ville. (OUANDAOGO 2008) Partout ailleurs, le bed-rock est enfoui sous des altérites argilo - sableuses dont l'épaisseur atteint par endroit 40 m. Les réserves d'eau souterraines sont discontinues et se localisent dans les zones broyées induites par le dense réseau de failles qui affectent le substratum. Les réserves souterraines sont contenues dans deux types de nappe : l'une superficielle située à la base de la cuirasse latéritique et dans les altérites argileuses ainsi que les alluvions, l'autre plus profonde constituée par les arènes grenues et la frange fissurée du substratum. La recherche d'eau dans un tel contexte se ramène à la recherche et à la caractérisation des fractures. Tout comme les eaux de surface, les eaux des nappes superficielles sont très vulnérables aux pollutions diverses. Toutes deux sont également sensibles aux variations interannuelles des précipitations. La carte géologique de la ville de Ouagadougou est représentée dans la figure ci-dessous :

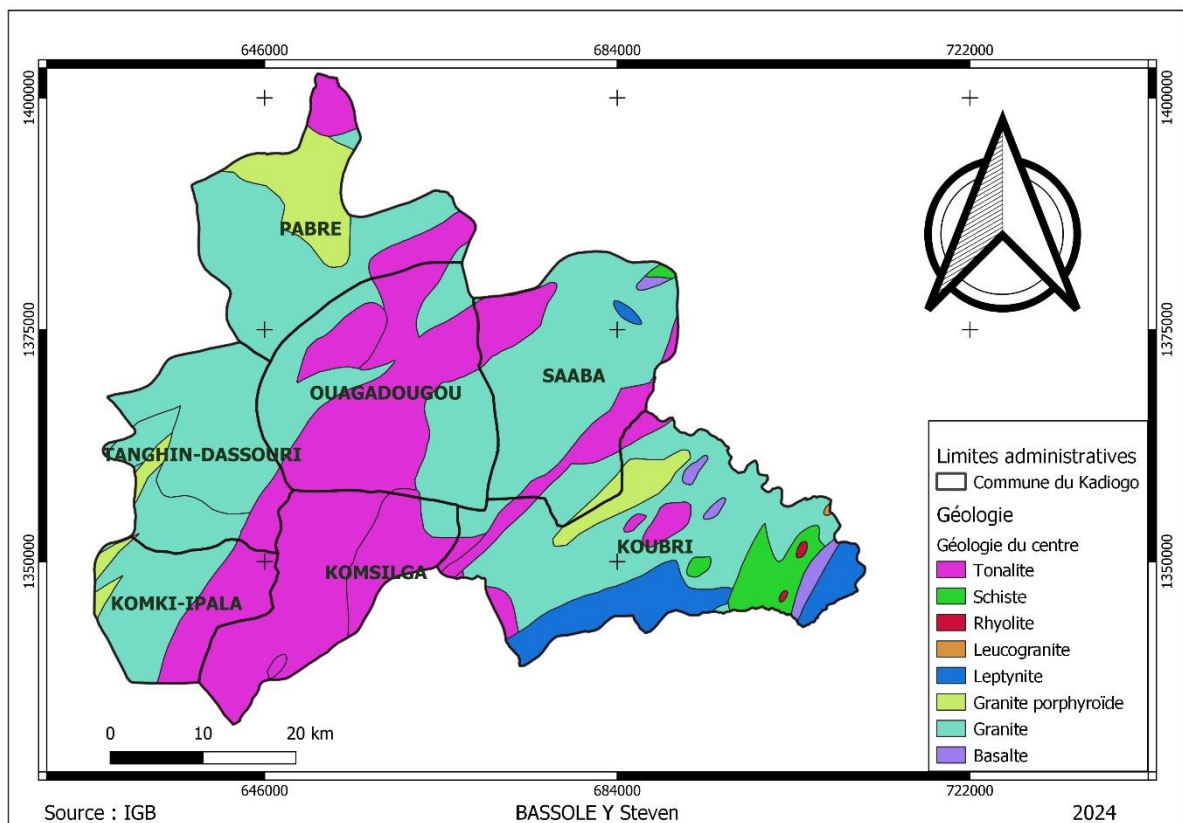


Figure 4 Géologie de la région du Centre

2.2. Méthodologie générale de l'étude

2.2.1. Méthodologie de prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération assez délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté. Il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (Rodier, 2009). Il est donc nécessaire de développer une méthodologie adaptée à chaque cas et d'utiliser le matériel convenable.

Au niveau de chaque forage, un flacon en verre de 1L stérile ainsi qu'un flacon en plastique de 1L et un autre en plastique de 300 mL ont été utilisés pour la collecte des échantillons afin de réaliser respectivement pour les analyses microbiologiques, physico-chimiques et les éléments traces métalliques. Avant la sortie, chaque récipient est d'abord lavé au préalable avec du détergent puis rincé abondamment avec de l'eau distillé. Les flacons en verres sont stérilisés à l'autoclave à 121°C.

La procédure de prélèvement pour les analyses microbiologique nécessite que les bords du robinet soient bien nettoyés et stériliser par flambage ainsi que le milieu environnant à l'aide d'un chalumeau. Pendant le prélèvement la flamme est tenue près du robinet afin de stériliser. Des glacières ont été utilisées pour la conservation des échantillons qui ont été acheminés au laboratoire. Un délai de 48 heures au maximum a été respecté pour le dosage des ions majeurs et les ions mineurs ainsi que les paramètres microbiologiques.

2.2.2. Méthodologie d'analyses des échantillons

2.2.2.1. Paramètres *in situ*

La conductivité électrique, le pH et la température ont été mesurés sur le terrain. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre étanche portatif à microprocesseur de type WTW 3310 SET 1 muni d'une électrode, et la conductivité avec un conductimètre portatif étanche de même type que le pH-mètre muni d'un thermomètre.

2.2.2.2. Paramètres chimiques

La méthodologie d'analyse des échantillons d'eau souterraine à Ouagadougou a été réalisée en utilisant différentes techniques analytiques pour déterminer les paramètres chimiques clés. Les analyses ont été effectuées selon les méthodes suivantes :

 **Volumétrie** : La détermination de la dureté, du titre alcalimétrique complet, du calcium, du magnésium et des chlorures a été réalisée par volumétrie. Cette méthode implique

l'utilisation de réactifs titrants pour mesurer la concentration des ions dans les échantillons. ([Voir Annexe 6](#))

✚ **Spectrophotométrie d'absorption moléculaires avec le DR 3900** : Les analyses des nitrites, nitrates, phosphore, fer total, fluorure et sulfates ont été effectuées par spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Cette technique permet une mesure précise des concentrations de ces composés dans les échantillons d'eau ([Voir Annexe 7](#)).

✚ **Spectrométrie d'émission optique avec plasma couplé par induction (ICP-OES)** : La détermination du sodium, du potassium et des éléments traces métalliques a été réalisée par spectrométrie d'émission optique. Cette méthode utilise un plasma de haute température pour vaporiser et exciter les éléments présents dans les échantillons, permettant ainsi une mesure précise des concentrations de chaque élément ([Voir Annexe 7](#)).

2.2.2.3. Paramètres microbiologiques

Les microorganismes choisis pour l'analyse, tels que les coliformes totaux, les coliformes fécaux, *Escherichia coli*, les streptocoques fécaux et les germes totaux, sont des indicateurs pertinents de la qualité microbiologique de l'eau en raison de leur présence dans les matières fécales humaines et animales. Ces bactéries sont utilisées pour évaluer le niveau de contamination fécale de l'eau et les risques potentiels pour la santé publique.

Ainsi la recherche des bactéries indicatrices dans l'eau a été réalisé selon la méthode par filtration sur membrane (RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Cette méthode a consisté à filtrer un volume de 100 mL de l'échantillon à travers une membrane de porosité de 0,45 micromètres de diamètre spécifique qui retient les bactéries à sa surface. Ensuite la membrane est placée sur les boîtes de Pétri contenant les milieux sélectifs Chromoculte Coliformes Agar pour les coliformes (CT, CF) et Chromoculte Enterocoques Agar pour les streptocoques de façon que les bactéries se reproduisent et forment des colonies. Les boîtes de Pétri sont incubées à une température de 37°C pendant 24 heures pour les CT, 44°C pendant 24 heures pour les CF et 37°C pendant 48 heures pour les SF. Le nombre de colonies est proportionnel à la quantité de bactéries contenues dans l'échantillon à analyser. Les résultats sont exprimés en Unité Format Colonies par 100 ml (UFC/100mL) de l'échantillon initial.

Les germes totaux quant à elles ont été déterminé suivant la méthode d'ensemencement en profondeur qui consiste à introduire de façon stérile 1 mL de l'échantillon dans une boîte de

Pétri préalablement étiqueté puis a ajouté 20 mL du milieu de culture Plate Count Agar et le laisser se solidifier. La boîte de Pétri est ensuite incubé à une température de 37°C pendant 24 heures. Les résultats sont aussi exprimés en UFC/100mL.

2.2.3. Bilan ionique

La balance ionique (BI) s'appuie sur le principe que la somme des anions majeurs et la somme des cations majeurs sont équivalentes (concentrations exprimées en méq/L) :

$$[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$$

L'erreur en % est donnée par :

$$BI = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}$$

Une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative et acceptable que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10%. (Mahamane et Guel 2015)

2.2.4. Méthodologie d'analyse de données

La méthodologie d'analyse de données a été élaborée afin de traiter et d'interpréter de manière rigoureuse les résultats des analyses des échantillons d'eau souterraine de la ville de Ouagadougou. Cette section présente les différentes approches et outils statistiques utilisés pour analyser les données chimiques obtenues. Les analyses statistiques ont été effectuées avec la méthode de l'analyse en Composantes Principales (ACP) à l'aide du logiciel RStudio, tandis que le faciès chimique a été réalisée à l'aide du logiciel DIAGRAMME. Ces méthodes vont permettre d'obtenir des informations précieuses sur la qualité des eaux souterraines de la région et de formuler des recommandations pour leur gestion et leur protection.

2.2.4.1. Analyse statistique en composante (ACP) avec Rstudio

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique puissante utilisée pour explorer et résumer les données multidimensionnelles. (Sadat et al. 2011). C'est une technique de représentation des données sous certains critères algébrique et géométrique, son objectif est d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans les tableaux des données et d'en fournir une représentation graphique simple à interpréter compte tenu des corrélations des données (Mudry et al. 1986).

L'ACP a été réalisé sur une matrice de données contenant 09 variables illustrant les ions majeurs des eaux sur 28 individus désignant les forages. Le but recherché est de mettre en évidence les relations entre les ions majeurs d'une part et la distribution des forages compte tenu de l'ensemble de leurs caractères chimiques d'autre part (Mounjid, Fadlaoui, et Belhouari 2014).

2.2.4.2. *Le faciès chimique avec le logiciel DAIGRAMME*

Le faciès chimique d'une eau, également appelé composition chimique, fait référence à la quantité et à la nature des composants chimiques présents dans cette eau. L'analyse du faciès chimique d'une eau est essentielle pour comprendre sa qualité, son origine et son évolution (Mahamane et Guel 2015). Pour bien identifier les faciès hydro-chimiques et évaluer la qualité des eaux souterraines, nous avons utilisé le diagramme de Piper. Ce diagramme permet de représenter simultanément plusieurs échantillons d'eau et de caractériser les faciès hydro-chimiques. Il se compose de deux triangles, l'un pour les faciès cationiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) et l'autre pour les faciès anioniques (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), ainsi que d'un losange qui synthétise le faciès global en montrant l'intersection des lignes provenant des points identifiés sur chaque triangle.

Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Présentation des points de prélèvements

Les prélèvements d'échantillons ont été réalisés sur les forages en fonctionnement à Ouagadougou. Sur près de 120 forages, seulement 28 forages étaient toujours fonctionnels ce qui nous a contraint à ne se limiter qu'à 28 prélèvements. Malgré ce faible nombre, la répartition de ces forages dans l'espace permet d'illustrer la qualité des eaux souterraines dans la ville de Ouagadougou. La figure 5 présente la position de chaque forage dans la ville de Ouagadougou selon le nouveau découpage (Grand Ouaga) qui inclut les communes environnantes de Ouagadougou tels que Pabré, Tanghin Dassouri, Komki-Ipala, Komsilga, Koubri et Saaba. De plus, nous remarquons que la majorité des forages se situe dans les quartiers périphériques de Ouagadougou.

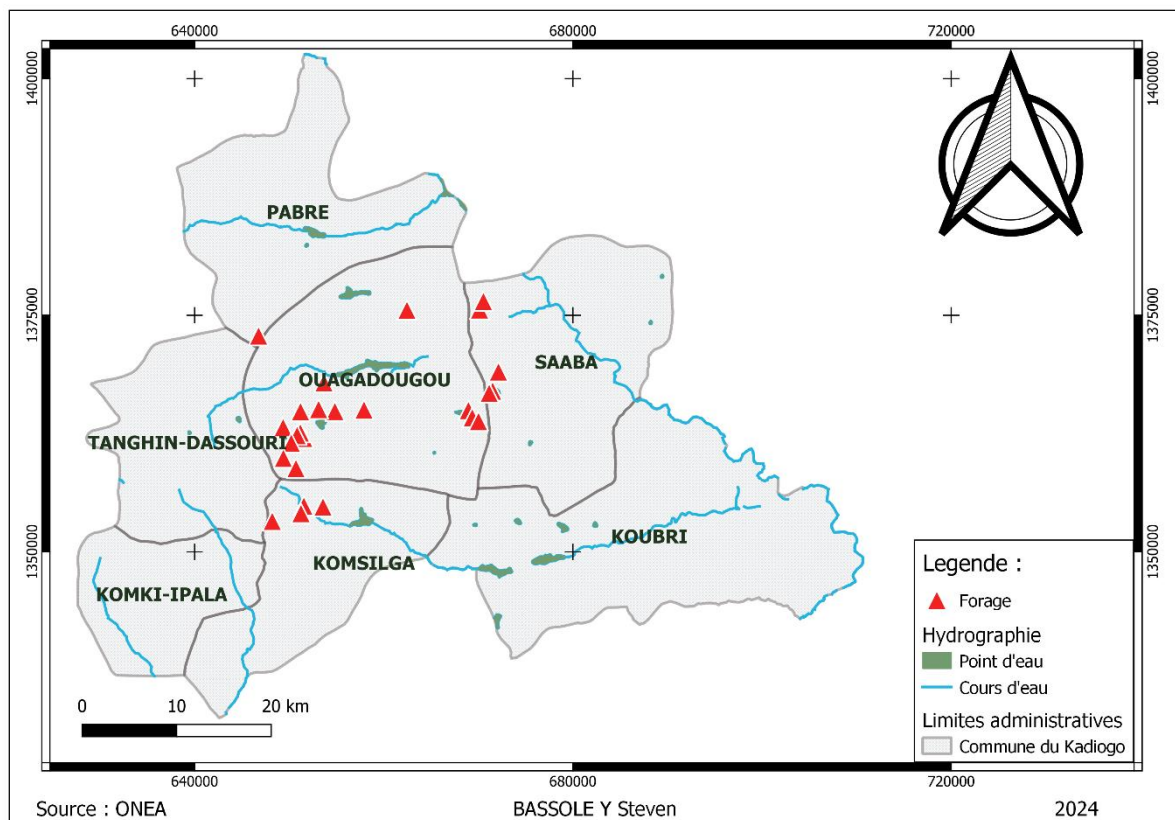


Figure 5 Localisation des différents forages de l'ONEA étudié

3.2. Résultats des analyses physico-chimiques

3.2.1. Résultats du Bilan Ionique

La balance ionique de nos échantillons ([Voir Annexe 3](#)) sont au-dessus de la norme qui est de 10% ce qui montre que l'analyse chimique réalisée est discutable. Seul l'échantillon ZAGTOULI SE 03 possède une balance ionique de 3%. Cette non concordance de la majorité des échantillons au bilan ionique pourrait s'expliquer par le fait que certains anions comme les silices n'ont pas été pris en compte parmi les paramètres étudiés. En effet le sol latéritique de la commune de Ouagadougou est essentiellement composé de silice ce qui fait que cet élément pourrait être abondant dans la composition chimique des eaux souterraines du fait qu'il y'a échange entre la roche et la nappe. Cela pourrait même s'expliquer par le fait que la somme de cations des échantillons est largement supérieure à celles des anions.

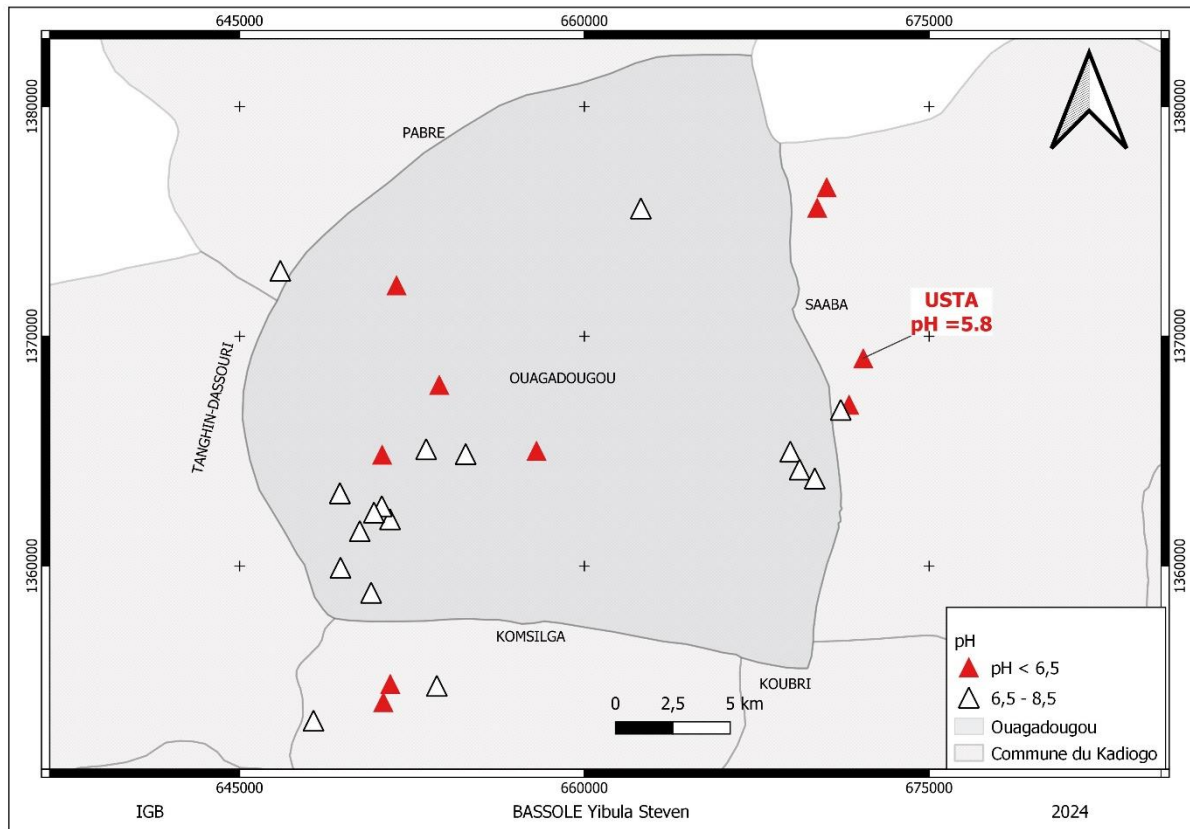
3.2.2. Paramètres Physiques

Les paramètres tels que la température, le pH, la turbidité et la conductivité électrique ont été déterminés.

❖ Le Potentiel Hydrogène pH

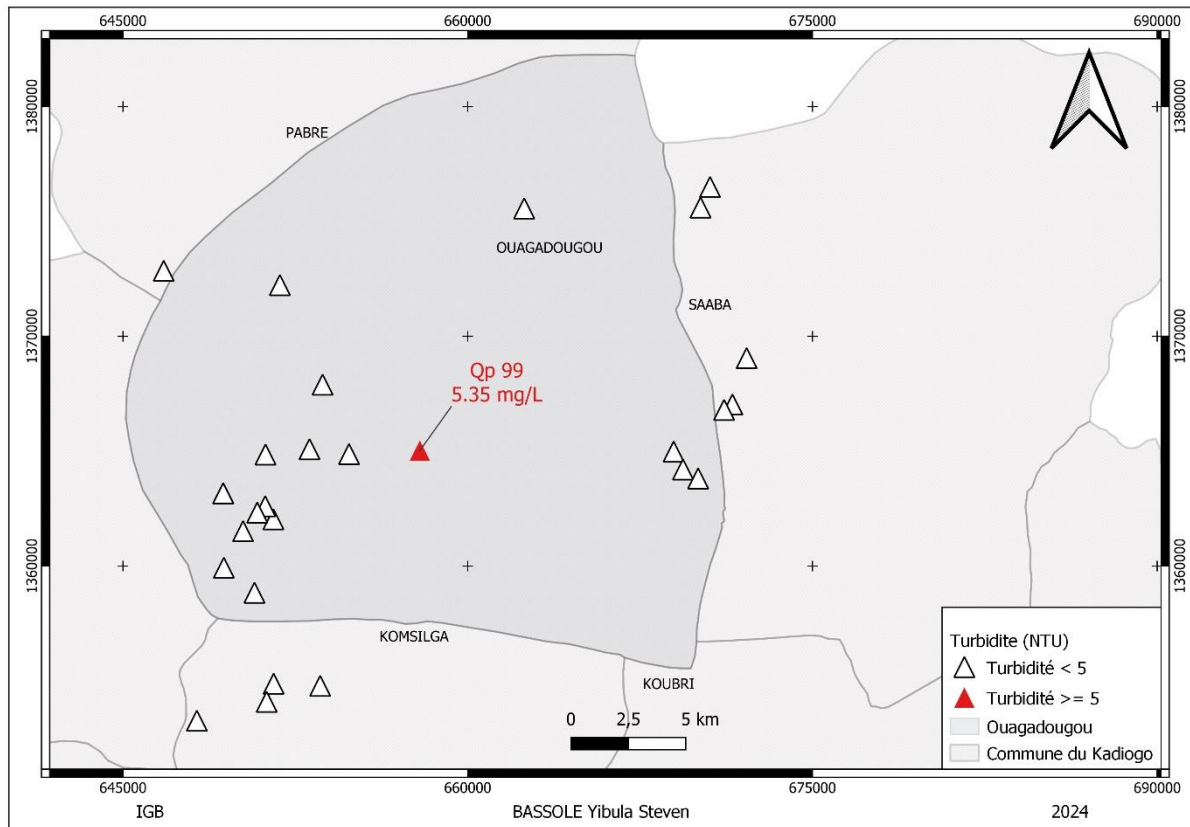
L'analyse des échantillons a révélé une gamme variée de valeurs de pH, allant de 5,8 à 8,1. La moyenne du pH est d'environ 6,9, avec une médiane de 6,7, ce qui indique une certaine variabilité dans les niveaux de pH des échantillons. Les valeurs de pH obtenues dans cette étude sont similaires à celles rapportées par A. SAWADOGO et al. (2023) pour les eaux souterraines de Ouagadougou, qui variaient de 5,9 à 7,4.

Les résultats ont montré que certains forages, tels que MARKOUSSI SE 05, NABITENGA SE 01 Qp99, Zongo SE09, NOWARBA SE06, NOWARBIN SE09, RETENUE, RIMKIETA SE07, USTA., présentaient des niveaux de pH relativement acides, tandis que d'autres, comme BOASSA SE 04 et GHOGO SE 01, avaient des niveaux de pH plus alcalins ([Voir Annexe 1](#)). Le caractère acide des échantillons pourrait être dû au profil latéritique et alumino-férrugineux de la cuirasse du sol de Ouagadougou (OUANDAOGO et Yameogo 2008). Le pH est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau. (Kahoul et Touhami 2014). Un pH bas altère aussi la minéralisation et les teneurs en métaux. Par contre le profil légèrement alcalin de certains forages pourrait être dû au colmatage par les carbonates. (Detay 1993)



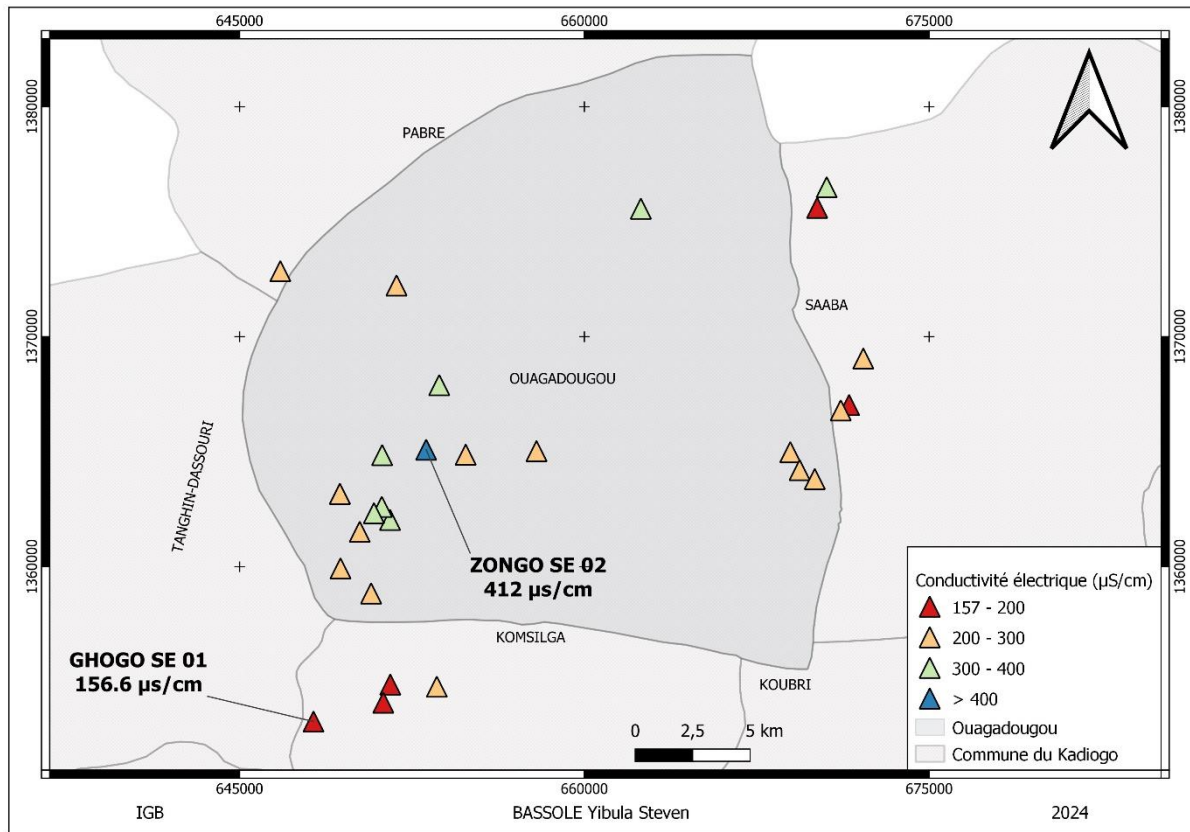
❖ La turbidité

La turbidité permet de quantifier le degré de clarté de l'eau. Selon les normes organoleptiques de l'OMS la turbidité d'une eau jugée potable ne doit pas excéder 5 NTU. Pour ce paramètre, la quasi-totalité des échantillons montre une turbidité inférieure à 1 NTU. Cela montre que l'eau de ces forages contiennent une quantité infime de matière en suspension. Néanmoins il faudrait noter qu'une eau claire n'est pas synonyme d'une eau potable. Cependant nous remarquons que le forage « RIMKIETA SE 07 » est le seul qui présente une teneur en turbidité de 5,35 qui ne respecte pas la norme de l'OMS ([Voir Annexe 1](#)). L'explication de la teneur en turbidité élevé pourrait être dû par la rouille que subit le tubage du forage.



❖ La conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer rapidement, mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (Mahamane et Guel 2015). Dans les échantillons analysés, les valeurs de conductivité électrique varient de manière significative, allant de 156,6 à 412 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La moyenne de la conductivité électrique est de 260,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une médiane de 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$, illustrant une certaine variabilité dans les niveaux de conductivité électrique des échantillons. Ces résultats sont alignés avec celles de Al-DJIBERT (2015) et de OUANDAOGO (2008) affichant des valeurs moyennes respectivement de 358 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et $\mu\text{S}/\text{cm}$. Certains forages, tels que ZONGO SE 02, POLOGO et NIOWARBIN SE 09, affichent des niveaux élevés de conductivité électrique, dépassant les 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ reflétant un fort taux de minéralisation, tandis que d'autres, comme GHOGO SE 01, DAYOUBSI SE 01 et NABITENGA SE 01, présentent des niveaux plus faibles, inférieurs à 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Voir Annexe 1) (RODIER, LEGUBE, et MERLET 2009). Malgré cette variation, tous les forages étudiés respectent la norme de qualité qui est de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et cela nous montre que ces eaux sont faiblement minéralisés indiquant une profondeur moyenne des forages.



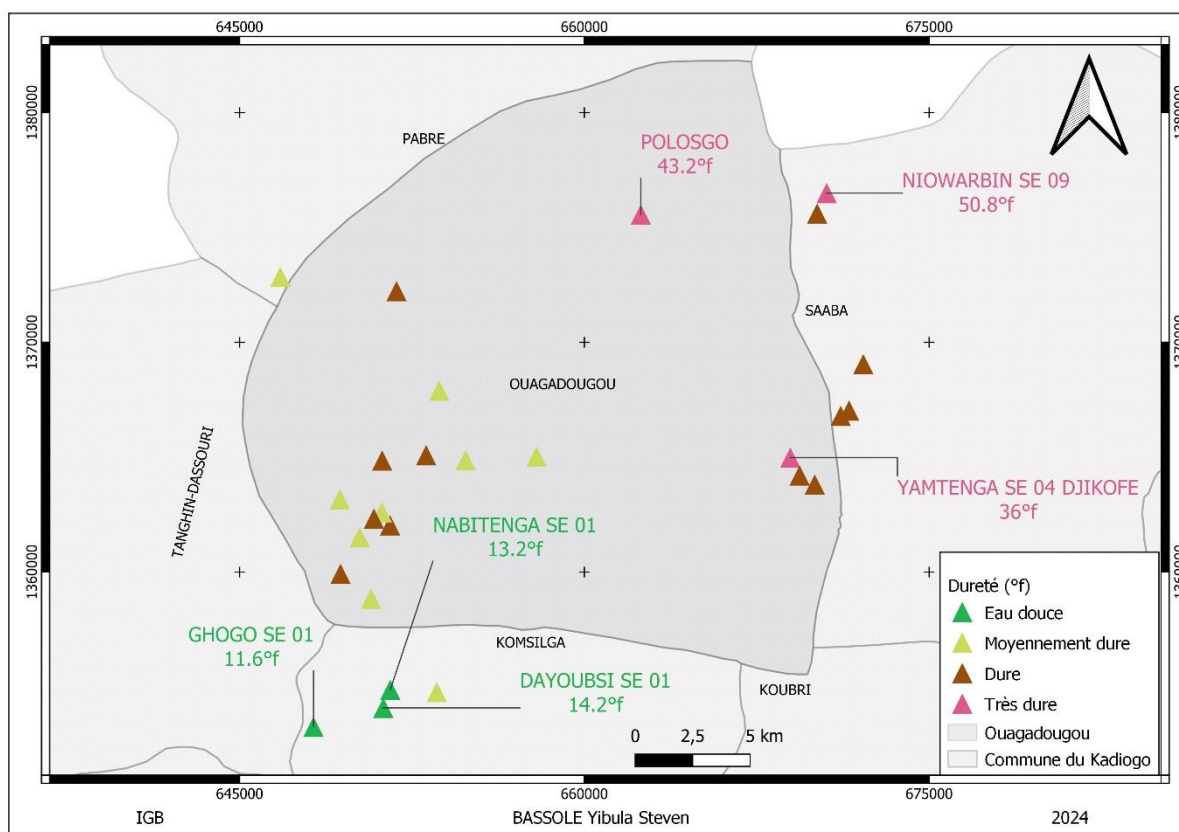
3.2.3. Paramètres Chimiques

❖ La dureté (TH)

La dureté totale de l'eau est une mesure de la concentration des ions calcium et magnésium dans l'eau, exprimée en degrés français (°f). Dans l'échantillon analysé, le TH (Taux d'Hydrogénocarbonate) varie de manière significative, allant de 11,6 à 50,8 °f (soit 116 à 508 mg/L de CaCO_3) avec une moyenne de 25,25 °f.

Les valeurs les plus élevées de TH, telles que celles observées dans les forages NIOWARBIN SE 09, POLOGO et YAMTENG SE 04 DJIKOFE, indiquent que ces eaux sont de nature très dure pouvant affecter les canalisations et le lavage du linge. Par contre, les valeurs plus faibles de TH, telles que celles observées dans les forages GHOGO SE 01, NABITENGA SE 01 et DAYOUBSI SE 01, signalent une concentration plus faible en hydrogénocarbonates exprimant donc une eau moyennement douce ([Voir Annexe 1](#)).

La dureté totale de l'eau n'a généralement pas d'effets néfastes sur la santé humaine, mais elle peut avoir des effets esthétiques tels que des dépôts calcaires dans les canalisations et les appareils ménagers.



❖ Le titre alcalimétrique complet

Dans l'échantillon analysé, le TAC (Taux d'Alcalinité Complète) varie de manière significative, allant de 3,9 °f à 15,9 °f (soit de 47,58 à 193,98 mg/L de HCO_3^-). Les valeurs de TAC rapporté par cette étude sont semblables à celles obtenues par Ouandaogo (2008) sur les eaux souterraines de Ouagadougou avec des valeurs comprise entre 71 à 219,6 mg/L de HCO_3^- ([Voir Annexe 1](#)).

Les valeurs les plus élevées de TAC, telles que celles observées dans les forages ZONGO SE 02 (15,9 °f), BOASSA SE 07 (15,6 °f) et SANDOGO SE 08 (13,5 °f), indiquent une concentration plus élevée en bicarbonates, ce qui peut être le résultat de processus naturels. En effet les teneurs en HCO_3^- sont généralement modérées dans le milieu cristallin de l'ordre de 100 à 150 mg/l. Au-delà de 200 mg/l cela suppose que le CO_2 est produit dans l'aquifère à partir de la minéralisation de la matière organique.(OUANDAOGO 2008a)

D'autre part, les valeurs plus faibles de TAC, telles que celles observées dans les forages USTA (3,9 °f), SAABA MOSQUEE (4,6 °f) et NOWARBA SE 06 (5 °f), signalent une concentration plus faible en bicarbonates. Ces faibles niveaux de TAC faibles indiquent d'une absence de minéraux essentiels. En effet dans les réservoirs de socle, l'alcalinité provient principalement de l'altération de minéraux silicatés (Tardy, 1969 ; Bourrié, 1976). L'eau du sol chargée en CO_2 attaque les aluminosilicates et les constituants tels que Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , silice dissoute sont libérés en solution. Dans cette réaction l'acidité de l'eau est consommée et en conséquence l'eau devient de plus en plus alcaline au fur et à mesure que la réaction avance, c'est-à-dire que la concentration en HCO_3^- augmente. Mais la présence d'activité humaine cesse le processus d'enrichissement de ces eaux en alcalinité et en cations d'où les faibles teneurs en HCO_3^- .

❖ Le calcium

L'analyse des concentrations en calcium révèle une gamme variée, allant de 25,6 à 104 mg/L avec une moyenne de 57,2 mg/L. Aucun des échantillons ne dépasse la norme de qualité de 200 mg/L pour le calcium, ce qui indique une conformité satisfaisante de l'eau potable en termes de teneur en calcium. Les concentrations observées sont généralement faibles à modérées et ne présentent pas de risque immédiat pour la santé humaine.

Les concentrations les plus élevées de calcium dépassant largement la moyenne, telles que celles observées dans les forages NIOWARBIN SE 09 (104 mg/L), ZAGTOULI SE 05 (88 mg/L) et ZONGO SE 02 (83,2 mg/L), suggèrent une forte dissolution des minéraux contenant du calcium dans l'eau souterraine ([Voir Annexe 1](#)). Ces concentrations élevées peuvent être attribuées à une interaction accrue avec des formations géologiques riches en minéraux contenant du calcium, tels que le calcaire ou la dolomite (SECK 1997). Contrairement, les plus faibles concentrations de calcium, telles que celles observées dans les forages GHOGO SE 01 (25,6 mg/L), DAYOUBSI SE 01 (32 mg/L) et NABITENGA SE 01 (35,2 mg/L), indiquent une moindre présence de minéraux de calcium dans l'eau. Ces différences de concentration en calcium peuvent influencer la dureté de l'eau, avec des concentrations plus élevées de calcium associées à une eau plus dure. (Organisation mondiale de la Santé 2017)

❖ Le magnésium

La concentration en magnésium (Mg^{2+}) des échantillons présente une variabilité allant de 3,36 à 63,36 mg/L avec une moyenne de 25.95 mg/L. Aucun des échantillons ne franchit le seuil de

la norme de qualité de 150 mg/L pour le magnésium, témoignant ainsi de la conformité adéquate de l'eau potable en ce qui concerne sa teneur en magnésium.

Les échantillons ayant la concentration en magnésium la plus élevée sont POLOGO (63,36 mg/L), NIOWARBIN SE 09 (59,52 mg/L) et NOWARBA SE 06 (42,24 mg/L) tandis que les échantillons ayant la concentration la plus faible sont BASSINKO SE 09 (3,36 mg/L), ZINGERSSE SE 02 (10,08 mg/L) et NABITENGA SE 01 (10,56 mg/L) ([Voir Annexe 1](#)). Le magnésium étant un élément important pour la santé, sa présence dans l'eau potable à des niveaux adéquats est bénéfique. Cependant, des concentrations excessives peuvent avoir des effets laxatifs chez certaines personnes (Organisation mondiale de la Santé 2017).

❖ Le chlorure

Les concentrations de chlorure mesurées dans les échantillons varient de 0,355 mg/L à 11,36 mg/L avec une moyenne de 3,42 mg/L. Selon l'OMS, la norme de qualité pour ce paramètre est fixée à 250 mg/L. Ainsi tous les forages analysés présentent des concentrations en ions chlorure bien en deçà de la limite maximale recommandée par l'OMS. La qualité de l'eau en termes de chlorures est excellente pour tous les forages.

❖ Le sodium

Les concentrations de sodium varient de 0 mg/L à 12,18 mg/L avec une moyenne de 3,87 mg/L. Aucune des concentrations mesurées de sodium ne dépasse la norme de l'OMS de 200 mg/L, ce qui indique que toutes les eaux de forage analysées respectent les normes de l'OMS pour le sodium.

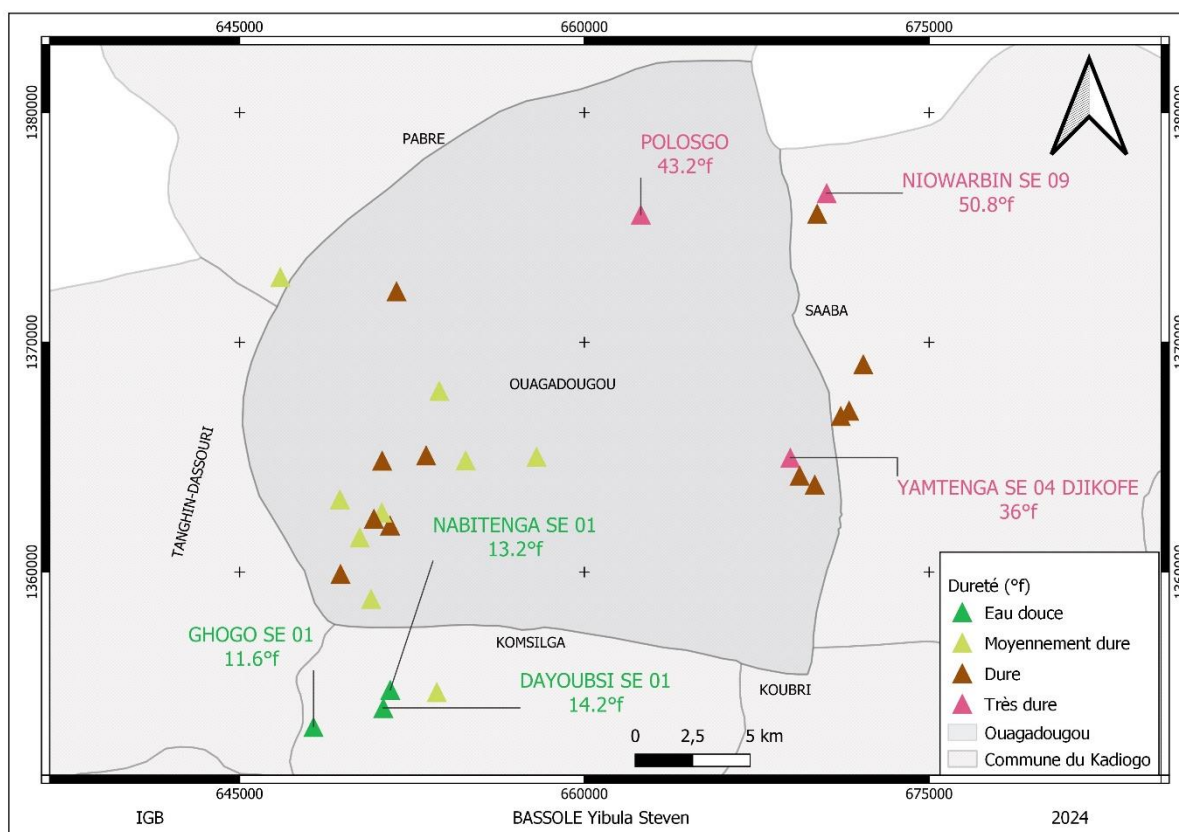
❖ Le Potassium

Les concentrations en potassium varient de 1,49 mg/L à 3,19 mg/L dans les différents forages analysés. Les concentrations de potassium observées dans tous les forages sont bien inférieures à la norme de 12 mg/L établie par l'OMS. Cela témoigne d'une qualité de l'eau en termes de potassium excellente, ne présentant aucun risque pour la santé publique.

❖ Les nitrates

Les résultats d'analyse des nitrates dans les échantillons de forages de la ville de Ouagadougou montrent des concentrations allant de 2,5 à 168,5 mg/L. avec une moyenne d'environ 37,2 mg/L. La norme de qualité pour les ions nitrate dans l'eau potable est fixée à 50 mg/L. Sur la base de ces résultats, plusieurs échantillons dépassent cette norme, notamment **USTA** avec 168,5 mg/L, **ZAGTOULI SE 03** avec 107,6 mg/L, **NIOWARBIN SE 09** et **SAABA MOSQUEE** avec 94,4 mg/L, **ZONGO SE 09** avec 75,2 mg/L, **PISSY SE 01** avec 55,1 mg/L et **NOWARBA SE06** avec 54,7 mg/L ([Voir Annexe 1](#)). Les concentrations élevées de nitrates peuvent être dû à la présence d'activité agricoles car l'utilisation de l'engrais sur les cultures peuvent être percolés vers les nappes phréatiques et ainsi les contaminés. De plus l'infiltration des eaux usées issus de latrines et de fosses septiques se trouvant autour du forage peuvent amener à des dépassements de la norme.

Les concentrations anormales de nitrate dans l'eau peuvent être préoccupantes car elles peuvent être associées à des problèmes de santé tels que la méthémoglobinémie chez les nourrissons communément appelé « syndrome du bébé bleu » (Organisation mondiale de la Santé 2017).



❖ Les nitrites

La concentration en ions nitrites (NO_2^-) observée sur la plupart des échantillons analysés donne des valeurs comprises entre 0,01 à 0,051 mg/L avec une moyenne de concentration de 0,03 mg/L. Les échantillons ayant la concentration en nitrite la plus élevée sont USTA (0,051 mg/L), MARKOUSSI SE 05 (0,045 mg/L) et BOASSA SE 04 (0,042 mg/L) tandis que les échantillons ayant la concentration en nitrite la plus faible sont ZAGTOULI SE 06 (0,014 mg/L), BOASSA SE 07 (0,014 mg/L) et SANDOGO SE 06 (0,012 mg/L) ([Voir Annexe 1](#)).

Aucun des échantillons ne dépasse la norme de qualité de 0,1 mg/L pour les ions nitrites (NO_2^-), ce qui indique une bonne qualité de l'eau potable en termes de teneur en nitrites. Les concentrations observées sont généralement faibles et ne présentent pas de risque immédiat pour la santé humaine.

❖ Le sulfate

L'analyse des concentrations en sulfate (SO_4^{2-}) révèle des résultats conformes aux normes de qualité de l'OMS pour l'eau potable, qui fixe une limite de 250 mg/L. Tous les échantillons présentent des concentrations en sulfate inférieures à la limite de 250 mg/L, ce qui indique une bonne qualité de l'eau en termes de sulfate.

Les concentrations en sulfate varient de 0 à 41 mg/L, avec une majorité des échantillons présentant des concentrations inférieures à 10 mg/L. Les échantillons ZAGTOULI SE 05, ZONGO SE 02 et Qp 99 ont les concentrations en sulfate les plus élevées avec respectivement 41 mg/L, 18 mg/L et 11 mg/L, mais restent bien en dessous de la norme de l'OMS.

❖ Le Phosphate

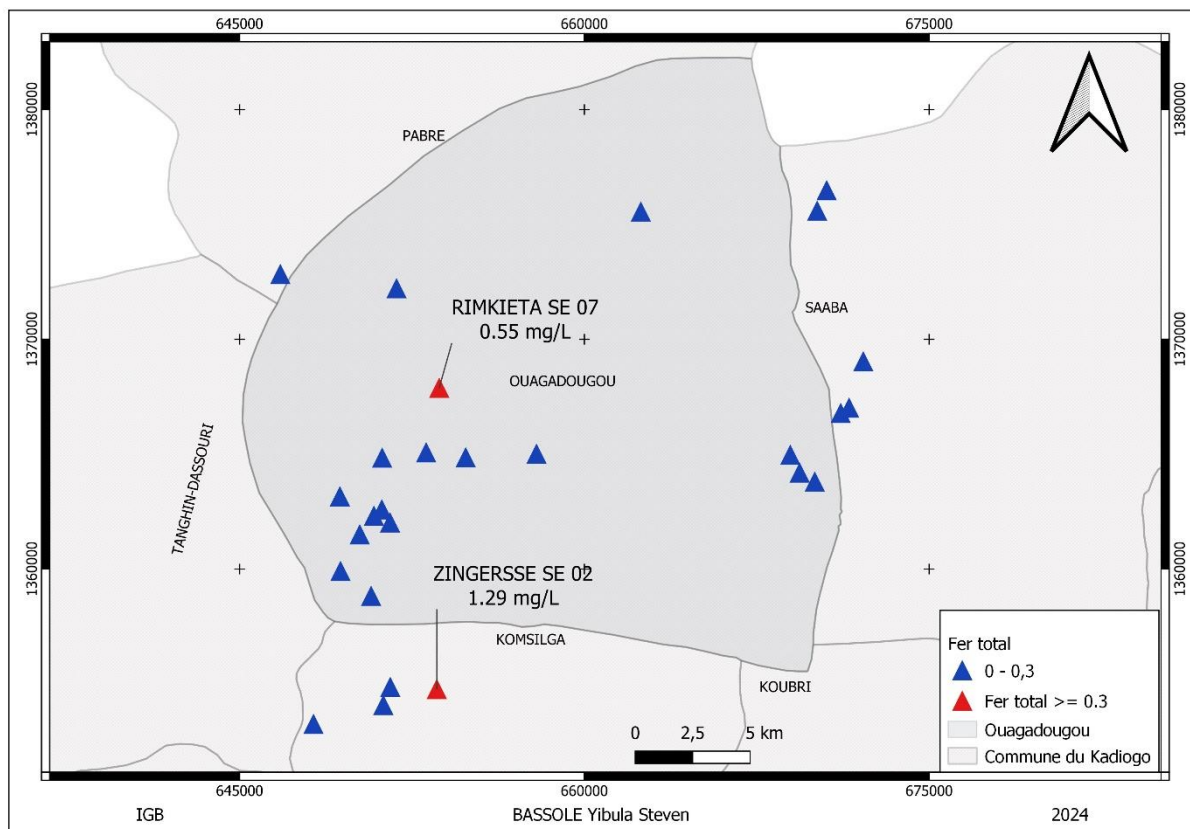
L'examen des concentrations en phosphate (PO_4^{3-}) indique une conformité aux normes de qualité de l'OMS pour l'eau potable, établies à 12 mg/L, ce qui indique une bonne qualité de l'eau en termes de phosphate.

Les concentrations en phosphate varient de 0,16 à 1,13 mg/L, avec une majorité des échantillons présentant des concentrations inférieures à 1 mg/L. Les échantillons **NOWARBA SE 06**, **YAMTENG SE 12** et **ZAGTOULI SE 06** ont les concentrations en phosphate les plus élevées, avec respectivement 1,13 mg/L, 1,02 mg/L et 0,96 mg/L ([Voir Annexe 1](#)).

❖ Le fer total

Le fer est un élément présent naturellement dans l'eau, mais des concentrations élevées peuvent être préoccupantes en raison de leur potentiel à causer des problèmes de santé et de qualité de

l'eau. Les résultats montrent une variation significative des concentrations de fer dans les échantillons, allant de 0 à 1,29 mg/L. La plupart des échantillons présentent des concentrations de fer inférieures à la norme de qualité de 0,3 mg/L, ce qui est une bonne indication de la qualité de l'eau des forages de la ville de Ouagadougou. Cependant, quelques échantillons dépassent cette norme, notamment **ZINGERSSE SE 02** avec 1,29 mg/L, **RIMKIETA SE 07** avec 0,55 mg/L et nous avons **SAABA MOSQUEE** avec 0,28 mg/L qui frôle la norme ([Voir Annexe 1](#)). Cette irrégularité de la quantité de fer dans ces forage pourrait être dû à la rouille subit par les équipements du fait de leur durée d'exploitation(MOUSSA NOMAO 2017). De plus il faut savoir que ces eaux sont aussi naturellement riches en fer, puisque le sol de Ouagadougou présente un profil latérique et alumino-férrugineux.(OUANDAOGO 2008a)



❖ Le Fluorure

Les résultats d'analyse des ions fluorure dans les échantillons de forages de la ville de Ouagadougou ont révélé des concentrations variant de 0,04 à 0,5 mg/L avec une moyenne d'environ 0.3 mg/L. Aucun des échantillons ne dépasse la norme de qualité fixée à 1,5 mg/L pour les ions fluorure (F^-), indiquant ainsi une conformité satisfaisante de l'eau potable en

termes de teneur en fluorure. Il est important de noter que le fluorure est un élément bénéfique pour la santé dentaire à des concentrations appropriées, mais peut être nocif à des concentrations excessives, provoquant notamment des problèmes dentaires et osseux.

3.2.4. Eléments traces métalliques

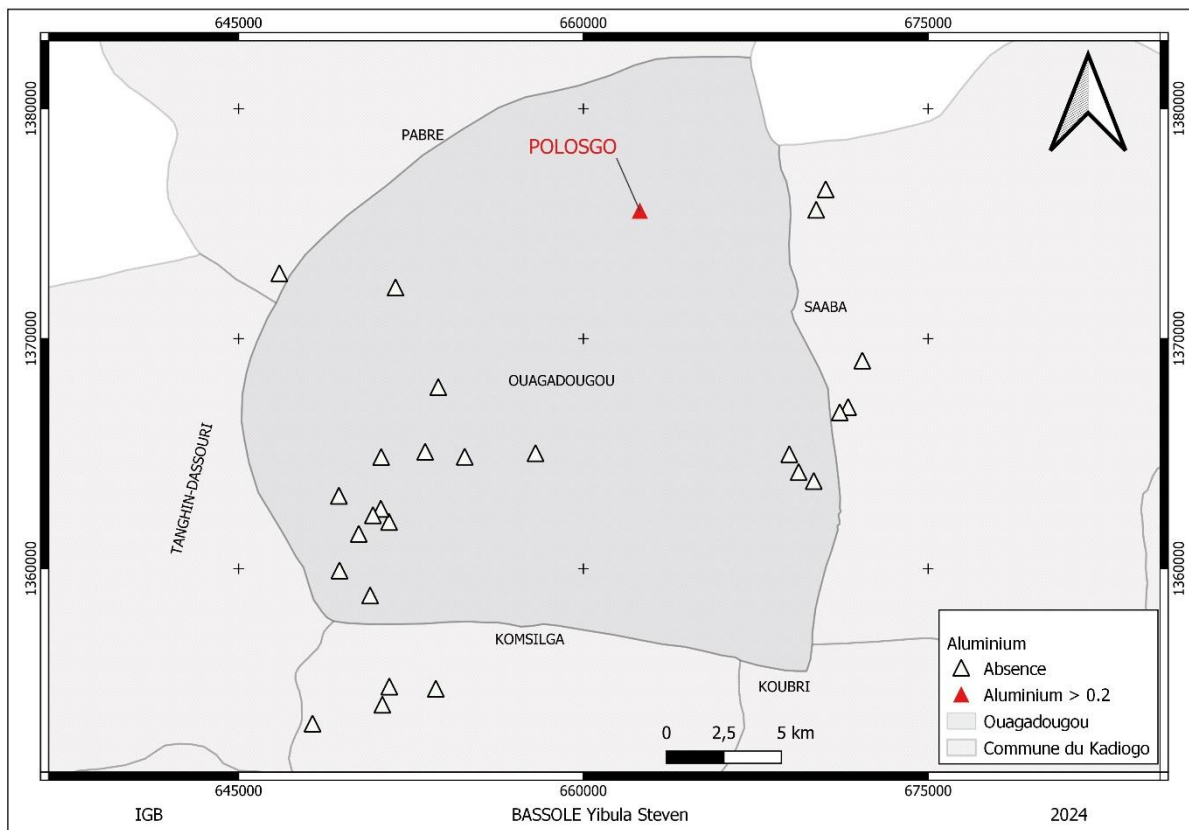
Les résultats d'analyses des éléments traces métalliques réalisées à travers l'ICP-OES ([Voir Annexe 2](#)) se présentent comme suit dans le tableau suivant :

Tableau I Caractéristique des éléments traces métalliques

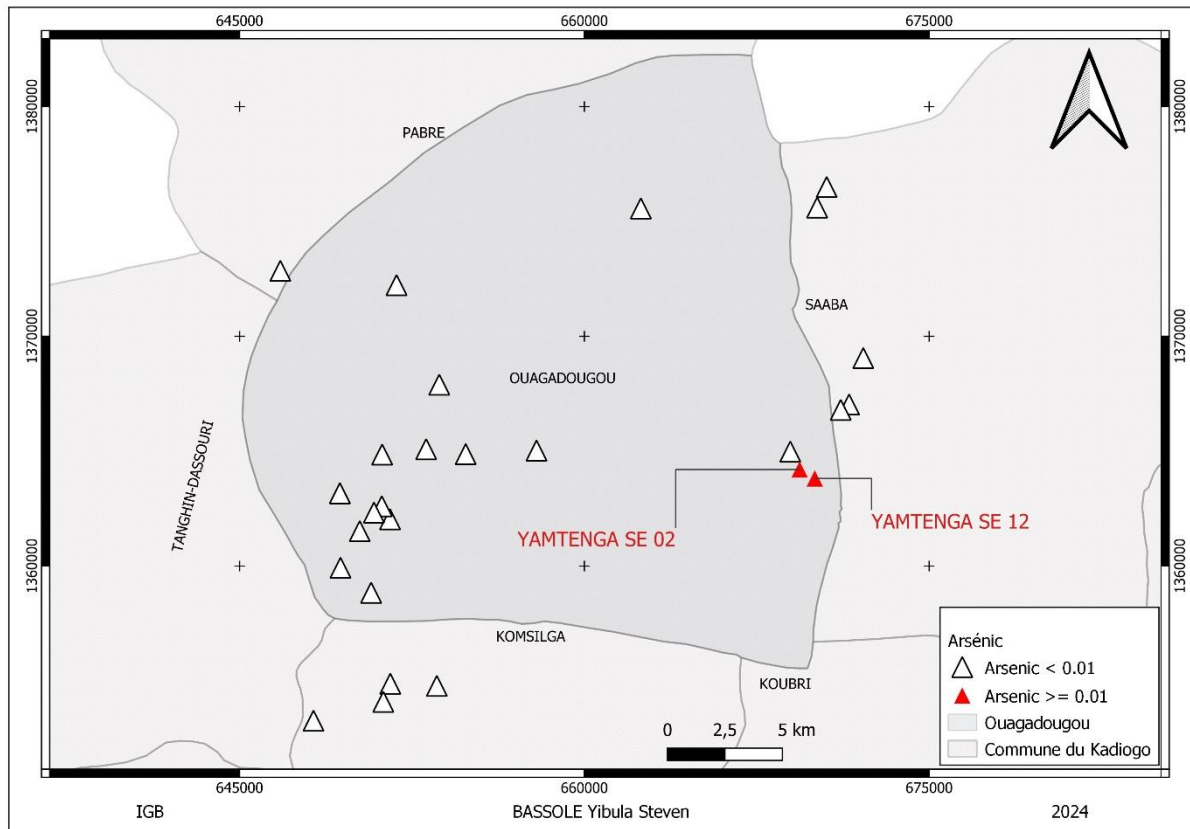
<i>Paramètres(µg/L)</i>	<i>Normes(µg/L)</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>
Argent (Ag)	5	0	0	0
Aluminium (Al)	200	0	294,53	10,52
Arsenic (As)	10	0	17,63	1,73
Cadmium (Cd)	3	0	0	0
Cobalt (Co)		0	0	0
Nickel (Ni)	70	0	11,22	0,49
Manganèse (Mn)	500	0	33,42	4,56
Cuivre (Cu)	2000	0	43,18	6,14
Zinc (Zn)	500	0	293,67	11,05
Chrome (Cr)	50	0	1,28	0,14
Plomb (Pb)	10	4,22	31,91	11,28

Les ETM tels que l'argent, le cadmium, le cobalt sont absents dans les forages exploités par l'ONEA. Le chrome, le cuivre, le nickel, le manganèse et le zinc sont bien présents dans ces eaux de forages mais restent en deca des limites fixées par l'OMS. Par contre, on note des dépassements de certains paramètres au niveau de quelques forages. Ces dépassements significatifs concernent principalement :

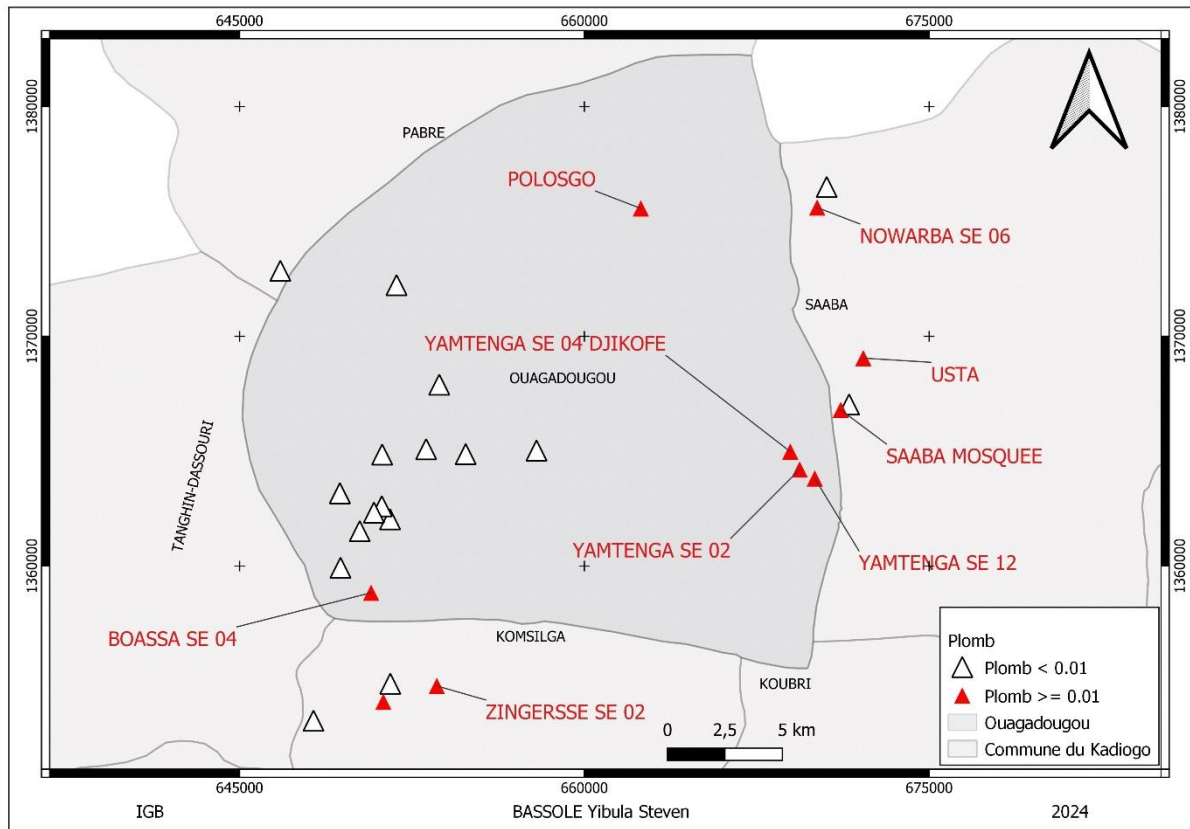
En ce qui concerne l'aluminium, seul le forage de POLOSGO avec une concentration de 0,294 mg/L dépasse la norme de l'OMS pour l'aluminium qui est de 0,2 mg/L. Cette présence anormale du plomb pourrait être dû à la présence des industries autour car ce forage se trouve dans la zone industrielle de Kossodo.



- ❖ Concernant l'arsenic, les forages YAMTENG SE 12 et YAMTENG SE 02 dépassent la norme de l'OMS, avec une concentration respectivement de 0,01763 mg/L et de 0,01416 mg/L, légèrement supérieure à la limite de 0,01 mg/L. Cette présence de l'arsenic pourrait être dû à l'infiltration d'une eau polluée par des résidus agricoles phosphatés, d'herbicides, d'insecticides et de déchets (Olivier 2015). En effet, la ville de Ouagadougou connaît de sérieux problèmes d'assainissement des déchets et les dépôts de déchets anarchiques pourraient ainsi altérer la qualité des nappes phréatiques.



- ❖ S'agissant du plomb, plusieurs forages présentent des concentrations de plomb supérieures à la norme de 0,01 mg/L. Les forages concernés incluent GHOGO SE 01, BOASSA SE 04, MARKOUSSI SE 05, POLOGSO, NOWARBA SE 06, NIOWARBIN SE 09, YAMTENG SE 04 DJIKOFE et YAMTENG SE 12. Les concentrations maximales observées vont jusqu'à 0,0216 mg/L.



La présence de métaux en quantité importante dans les eaux souterraines sont dues généralement aux activités industrielles par rejets d'effluents, lessivage des produits stockés sur un sol (DESBORDES 2000).

3.3. Résultats des analyses microbiologiques

L'évaluation de la qualité bactériologique des eaux de forages de la ville de Ouagadougou a été réalisée en se basant sur les analyses des germes totaux (GT), des coliformes totaux (CT), des coliformes fécaux (CF), de *Escherichia Coli* (E.coli) et des streptocoques fécaux (SF).

Tableau II Résultats des analyses bactériologiques

Nom	CT	CF	<i>E. coli</i>	SF	GT
Unité	UFC/100mL				
Normes	0	0	0	0	0
Qp 99	0	0	0	0	0
Pissy SE 01	0	0	0	0	0
ZONGO SE 02	0	0	0	2	0
ZONGO SE 09	0	0	0	0	0
ZAGTOULI SE 06	0	0	0	0	2,0.10 ²
ZAGTOULI SE 03	0	0	0	0	0
SANDOGO SE 04	0	0	0	0	1,0.10 ²
SANDOGO SE 08	1,39.10 ²	42	42	0	3,0.10 ²
ZAGTOULI SE 05	0	0	0	0	0
SANDOGO SE 06	0	0	0	0	1,0.10 ²
BOASSA SE 07	0	0	0	0	0
RIMKIETA SE 07	4,0.10 ³	71	20	0	1,92.10 ⁵
BASSINKO SE 09	4,96.10 ²	75	75	0	4,4.10 ³
ZINGERSSE SE 02	1,0.10 ²	59	19	0	5,3.10 ³
NABITENGA SE 01	3,36.10 ²	1,36.10 ²	90	0	1,56.10 ⁴
DAYOUBSI SE 01	0	0	0	0	2,6.10 ⁴
GHOGO SE 01	1,1.10 ²	45	45	0	1,84.10 ⁴
BOASSA SE 04	0	0	0	0	0
MARKOUSSI SE 05	0	0	0	0	0
POLOSGO	0	0	0	0	1,0.10 ²
NOWARBA SE 06	0	0	0	0	1,0.10 ²
NIOWARBIN SE 09	0	0	0	0	3,0.10 ²
USTA	0	0	0	0	2,0.10 ²
RETENUE	35	29	16	0	1,0.10 ²
SAABA MOSQUEE	0	0	0	0	9,0.10 ²
YAMTENGA SE 04 DJIKOFE	0	0	0	0	2,0.10 ²
YAMTENGA SE 02	0	0	0	0	3,0.10 ²
YAMTENGA SE 12	0	0	0	0	9,0.10 ²

❖ Germe totaux

Selon l'OMS, il n'y a pas de norme spécifique pour le nombre total de germes dans l'eau potable car la présence de germes n'indique pas nécessairement un risque pour la santé (Organisation mondiale de la Santé 2017). Cependant, une augmentation soudaine du nombre de germes peut indiquer une contamination de l'eau. Les résultats de l'analyse des germes totaux dans les échantillons d'eau montrent la présence de germes totaux au niveau de certains forages. Les échantillons qui ont des concentrations élevées de germes totaux sont **RIMKIETA SE 07** ($1,92.10^5$ UFC/100mL), **DAYOUBSI SE 01** ($2,6.10^4$ UFC/100mL), **GHOGO SE 01** ($1,84.10^4$ UFC/100mL), **NABITENGA SE 01** ($1,56.10^4$ UFC/100mL), **ZINGERSSE SE 02** ($5,3.10^3$ UFC/100mL) et **BASSINKO SE 09** ($4,4.10^3$ UFC/100mL). Certains échantillons présentent des concentrations faibles ou nulles en germes totaux, ce qui est positif en termes de qualité microbiologique de l'eau. Cependant, il est important de noter que même une seule UFC/100mL peut potentiellement indiquer une contamination et nécessite une attention particulière.

❖ Coliformes Totaux

Les coliformes sont un groupe de bactéries présentes dans l'environnement, y compris dans les matières fécales des êtres humains et des animaux. Leur présence dans l'eau peut indiquer une contamination par des matières fécales, ce qui peut entraîner un risque pour la santé humaine. Selon les normes de l'OMS, l'eau potable ne devrait pas contenir de coliformes fécaux.

Les résultats des analyses nous montrent que la plupart des forages ont un dénombrement de coliformes relativement faible (0 à 12), ce qui est généralement considéré comme acceptable. Cependant, plusieurs échantillons dépassent cette norme, ce qui est préoccupant du point de vue de la santé publique. Par exemple, **RIMKIETA SE 07** avec $4,0.10^3$ UFC/100mL, **BASSINKO SE 09** avec $4,4.10^3$ UFC/100mL, **NABITENGA SE 01** avec $1,56.10^4$ UFC/100mL, **SANDOGO SE 08** avec $1,39.10^2$ UFC/100mL, **GHOGO SE 01** avec $1,1.10^2$ UFC/100mL, **ZINGERSSE SE 01** avec $1,0.10^2$ UFC/100mL, **DAYOUBSI** avec 42 UFC/100mL et **RETENUE** avec 35 UFC/100mL ont des niveaux très élevés de coliformes totaux, dépassant de loin la norme de l'OMS. Ces résultats suggèrent une contamination importante de l'eau, ce qui peut présenter un risque pour les populations qui consomment cette eau (Organisation mondiale de la Santé 2017).

❖ Coliformes Fécaux

Selon les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'eau potable ne devrait contenir aucun coliforme fécal par 100 ml. Les coliformes fécaux sont des indicateurs de contamination fécale qui peuvent indiquer la présence de pathogènes dangereux.

En se basant sur ces normes, les forages tels que **NABITENGA SE 01, BASSINKO SE 09, RIMKIETA SE 07, ZINGERSSE SE 02, GHOGO SE 01, SANDOGO SE 08, RETENUE** ont tous des niveaux de coliformes fécaux qui dépassent les normes de l'OMS. Cela signifie que l'eau de ces forages n'est pas sûre à consommer sans traitement approprié. Cette contamination des eaux de forages semble résulter de la présence de latrines et de fosses septiques à l'alentour de ces forages. Les pratiques agricoles peuvent également contribuer à la contamination de l'eau. L'utilisation de fumier comme engrais peut entraîner une augmentation du nombre de coliformes fécaux dans l'eau du forage (Organisation mondiale de la Santé 2017; Asslouj et al. 2007).

❖ **Escherichia Coli**

Les E-Coli (*Escherichia coli*) sont des bactéries indicatrices de contamination fécale. Leur présence dans l'eau peut indiquer un risque pour la santé publique, notamment en ce qui concerne les maladies diarrhéiques. Selon les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'eau potable ne devrait contenir aucune bactérie *Escherichia coli* (*E-Coli*) par 100 ml. D'après les résultats obtenus, Certains forages tels que **NABITENGA SE 01, BASSINKO SE 09, RIMKIETA SE 07, ZINGERSSE SE 02, GHOGO SE 01, SANDOGO SE 08, RETENUE** ont montré la présence de bactéries E-Coli. La détection d'E-Coli dans l'eau peut résulter d'une contamination fécale, qu'elle provienne d'humains ou d'animaux. Cette contamination peut être le résultat de fuites ou de ruptures des systèmes d'assainissement, permettant aux eaux usées de se mélanger aux eaux souterraines, ou encore de l'épandage agricole, voire à la proximité d'animaux se nourrissant près des sources d'eau (Organisation mondiale de la Santé 2017; Asslouj et al. 2007).

La présence de CT, CF et de *E.coli* au niveaux de certains forages nous montre qu'elle constitue la cause de la contamination de ces forages aux nitrates en d'autres termes la présence de latrines et fosses septiques autour du forages engendre la pollution des forages aux nitrates.

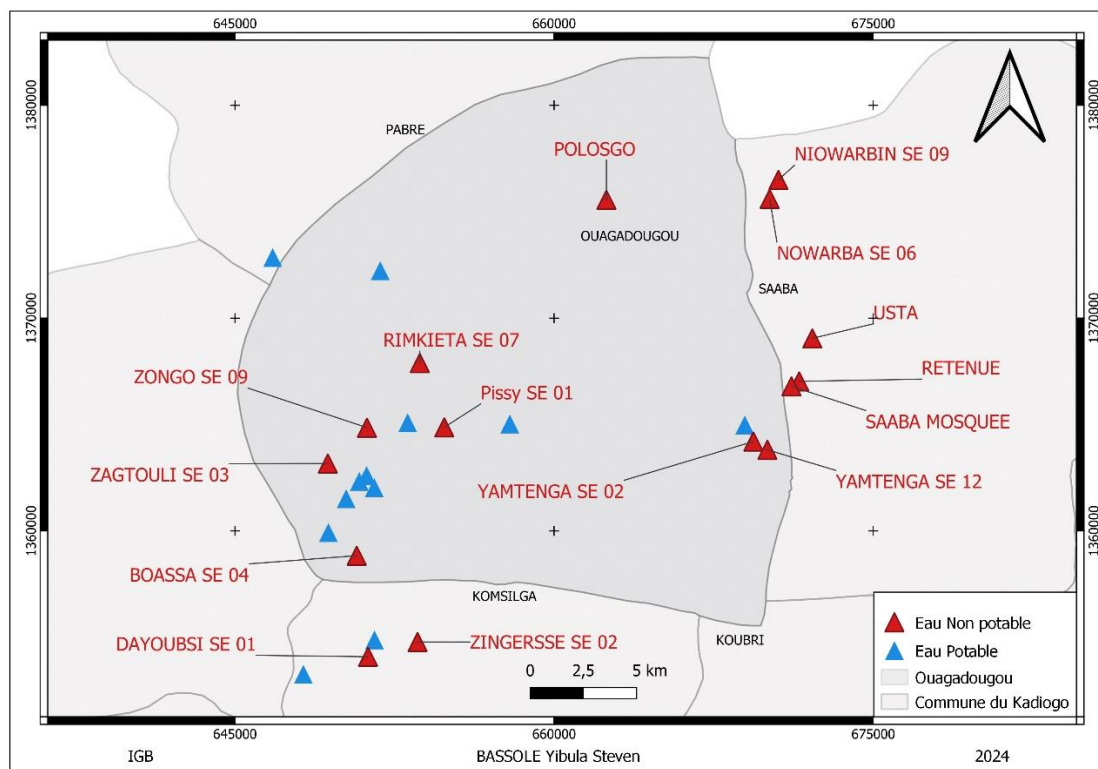
❖ **Streptocoques fécaux**

Selon les normes de OMS, l'eau potable ne devrait contenir aucun streptocoque fécal par 100 ml. Les analyses ont révélé que seul le forage **ZONGO SE 02** est contaminé par les

streptocoques fécaux avec une concentration de 2 UFC/100mL. Bien que cette valeur soit relativement très faible, sa présence dans l'eau peut représenter un risque pour la santé, car ils peuvent indiquer la présence d'autres pathogènes d'origine fécale qui peuvent causer des maladies, comme la gastro-entérite, la salmonellose, la dysenterie, l'hépatite A, la fièvre typhoïde, et d'autres maladies d'origine hydrique. Comme pour les bactéries d'E.coli, la présence des streptocoques fécaux dans l'eau peut être due à une variété de facteurs, y compris une mauvaise gestion des déchets, une mauvaise construction ou entretien des installations sanitaires, ou le ruissellement de l'eau de surface après la pluie à travers des zones contaminées.(Asslouj et al. 2007)

3.4. Carte de potabilité

En tenant compte des différents paramètres physico-chimiques et microbiologiques étudiés, une carte de potabilité a été élaborée afin d'illustrer la répartition spatiale de la qualité de l'eau des forages exploitées par l'ONEA à Ouagadougou.



3.5. Caractérisation de la variabilité chimique

3.5.1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'examen des résultats numériques de cette ACP montre que les valeurs propres indiquent que l'axe F1 indique 28,6% de la variance total des données et l'axe F2, 21,8% de la variance total des données. Ainsi, 50,4% de la variabilité du tableau de données est extraite par le plan factoriel F1*F2 ce qui est supérieure à la valeur référence de **44.7%**. De ce fait, l'analyse des résultats de l'ACP se fera en se limitant à ces deux premiers axes.

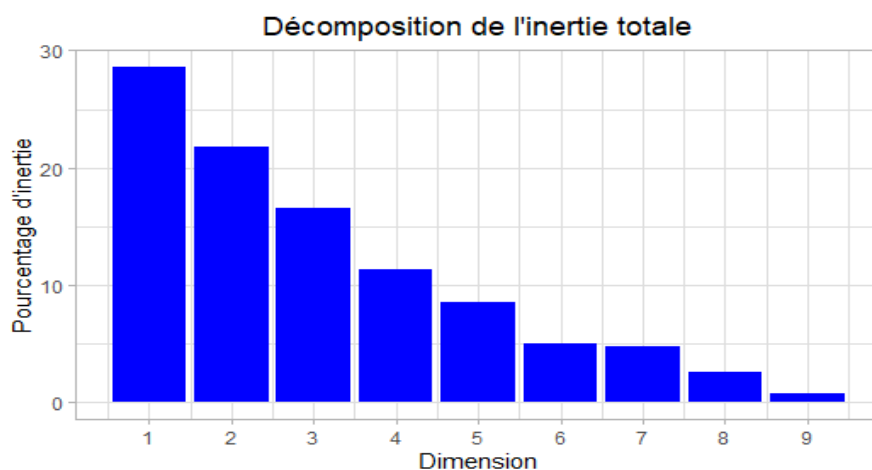


Figure 6 Tableau de décomposition des composantes

Le cercle de corrélation montre que 6 des 09 variables prises en compte dans l'ACP contribuent à la définition du plan factoriel F1 x F2 dont :

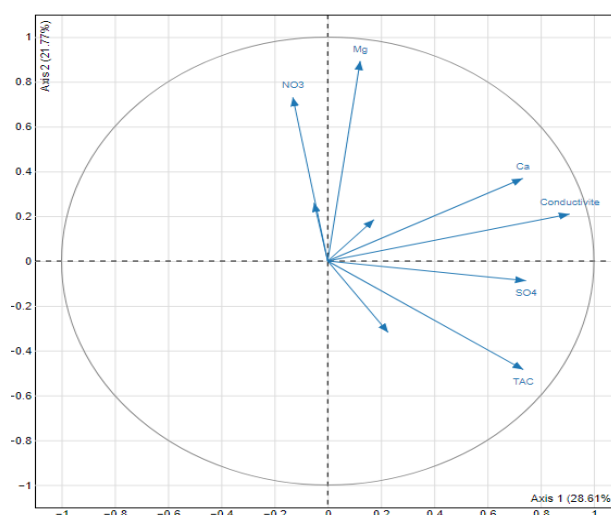


Figure 7 Cercle de corrélation des variables

La Dimension F1 est structurée par les variables Conductivité, Sulfate, les bicarbonates, et le calcium. Cette dimension exprime alors le degré de minéralisation des eaux de forages suivant un faciès bicarbonaté sulfaté et calcique. Leur présence est liée à la dissolution des

carbonates(Mounjid, Fadlaoui, et Belhouari 2014). Les éléments qui définissent ce facteur proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact eau-roche. Ces éléments proviennent de l'hydrolyse des minéraux silicatés présents dans les roches qui constituent le substratum rocheux des aquifères qui abritent les eaux de la région.

La dimension F2 regroupe les nitrates, les magnésiums qui ont le plus contribué à la formation de cet axe. Cette dimension indique le niveau de contamination des eaux de forage par les nitrates.. La présence des nitrates dans les eaux souterraines à une origine essentiellement anthropique et sont introduits dans le sous-sol, soit par lessivage des engrais épandus, soit par le rejet des eaux usées. Elle est aussi attribuée à la dégradation de la matière organique par les micro-organismes dans les couches superficielles du sol, avec production de CO₂ pour être entraînés ensuite en profondeur par les eaux d'infiltration(Amadou, Laouali, et Manzola 2014). La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques montre la répartition des points d'eau en fonction des différents facteurs F1 et F2. L'analyse de ce graphe a montré trois principaux regroupements des points d'eau :

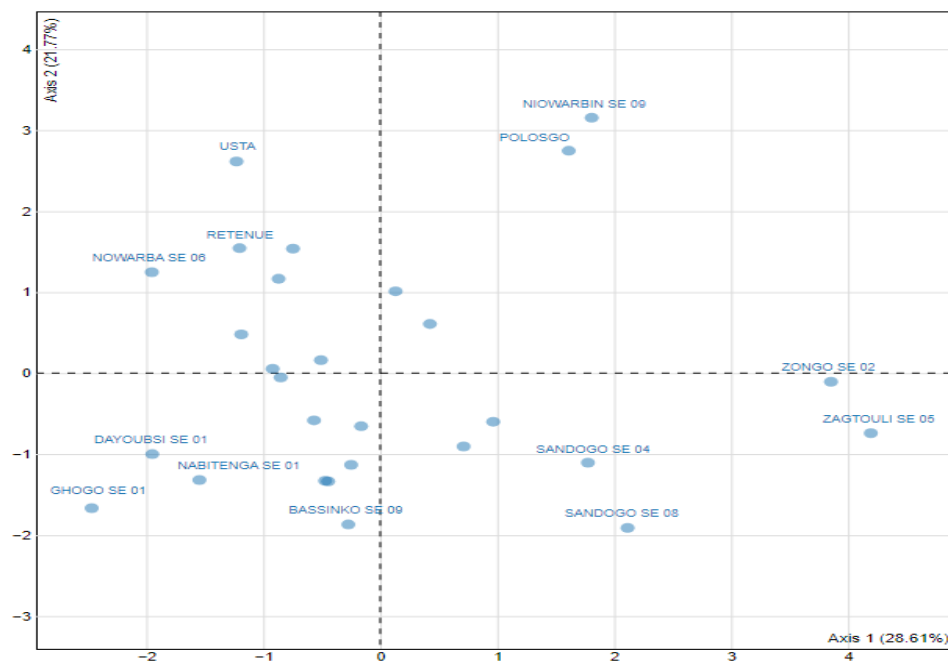


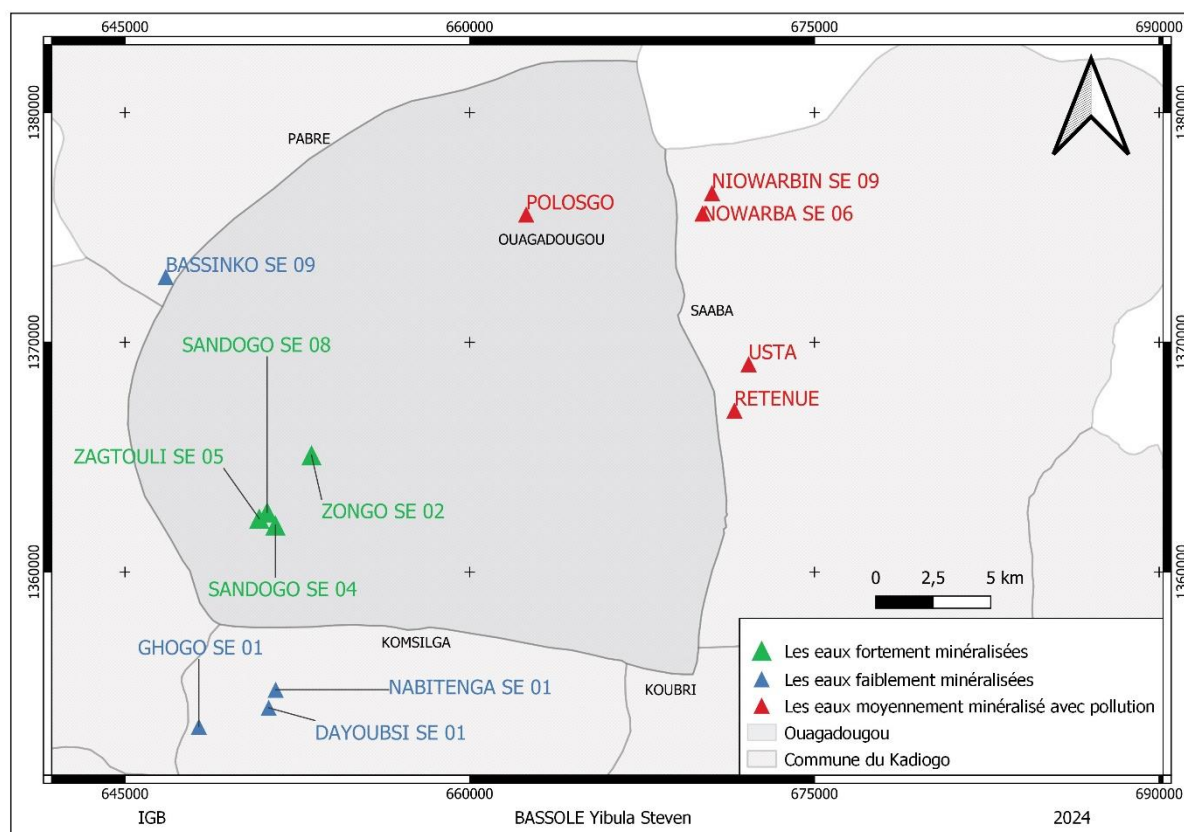
Figure 8 Répartition des forages sur le plan factoriel F1*F2

La classe 1 présentent des eaux fortement minéralisées avec la présence de fortes valeurs pour les bicarbonates, les sulfates, la conductivité électrique et le calcium présentant un faciès bicarbonaté calcique. Cette classe regroupe les forages ZONGO SE 02, SANDOGO SE 04,

ZAGTOULI SE 05 et SANDOGO SE 08. Ces points d'eau correspondent aux forages profonds qui captent le socle fracturé et concerne 14,28% des eaux.

La classe 2 regroupe les eaux faiblement minéralisées qui présente de faibles valeurs de calcium, de magnésium et de conductivité. Ce sont les forages BASSINKO SE 09, DAYOUBSI SE 01, GHOGO SE 01 et NABITENGA SE 01 et constitue 14,28% des eaux. Ces forages sont caractérisés par une profondeur moyenne avec des faibles teneur en bicarbonates(Ahoussi et al. 2010).

La classe 3 regroupe les eaux moyennement minéralisées avec la présence de fortes teneurs en nitrates. Il s'agit des forages NOWARBA SE 06, NIOWARBIN SE 09, USTA, POLOSGO et RETENUE.



3.5.2. Faciès chimique

Pour la description de la composition chimique des eaux souterraines dans la zone d'étude, les résultats des analyses chimiques sont représentés sur le diagramme de PIPER. La représentation des teneurs en ions majeurs sur ce diagramme, permet de distinguer deux groupes d'eaux :

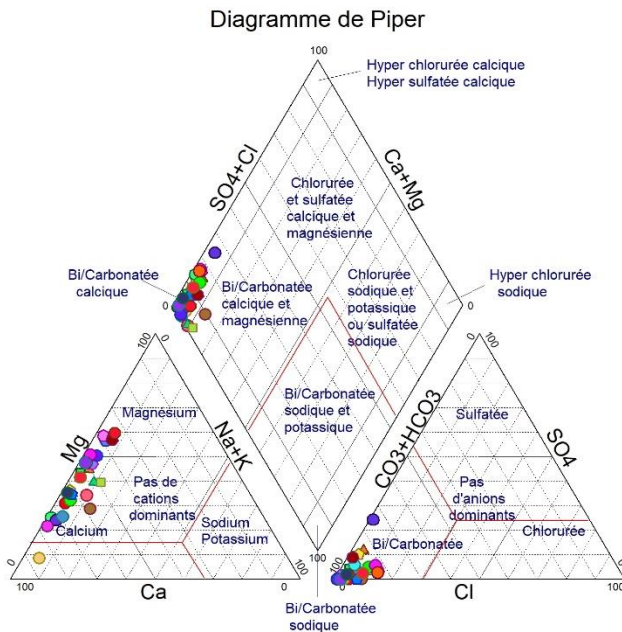


Figure 10 Diagramme de piper sans les nitrates

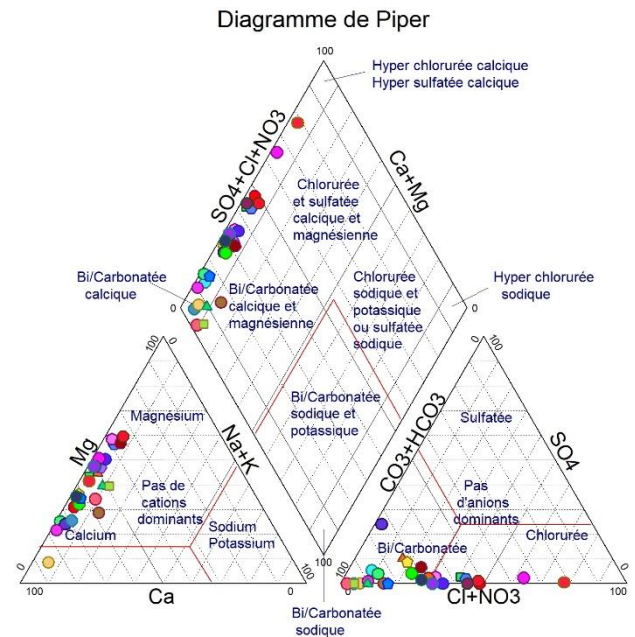


Figure 9 Diagramme de piper avec les nitrates

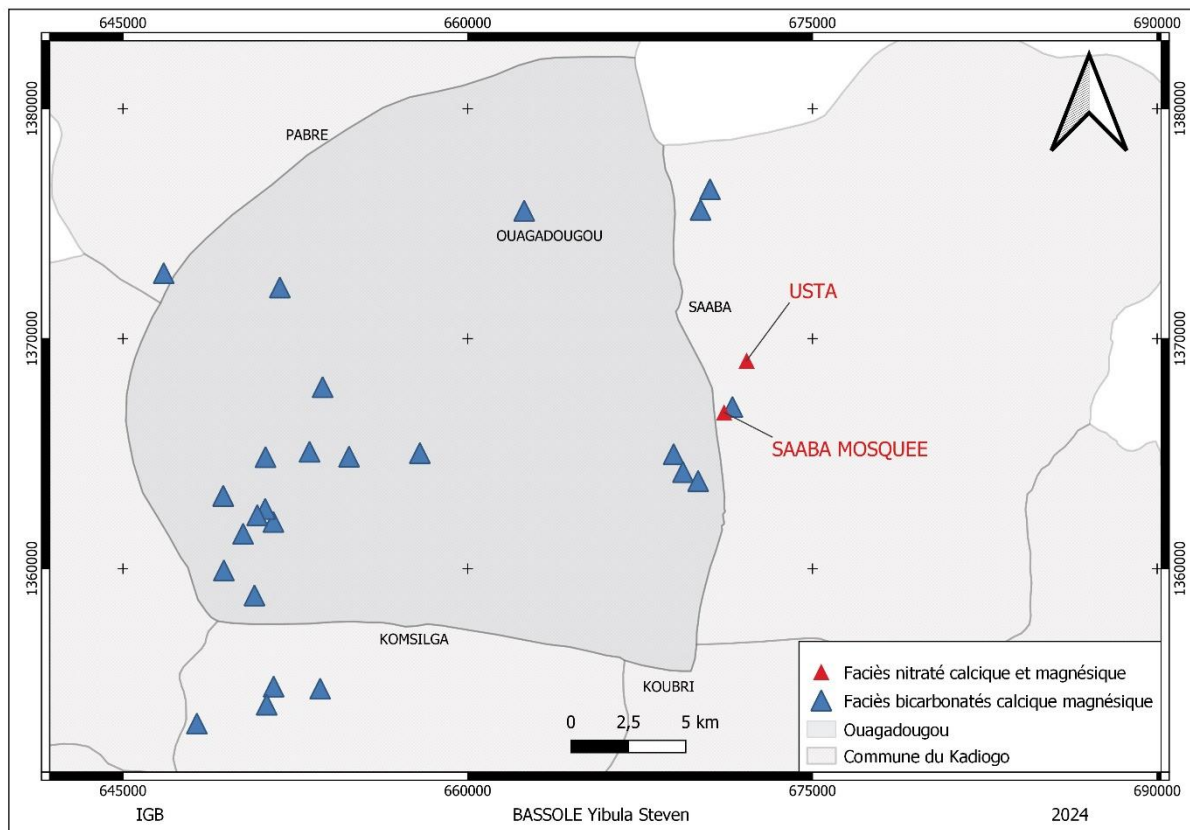
➤ Le faciès bicarbonaté calcique et magnésique

Toutes les eaux de forage analysées à l'exception du forage SAABA MOSQUEE et celui de USTA présentent un faciès bicarbonaté calcique magnésique. Cela représente 92,85% des eaux souterraines de la ville de Ouagadougou étudiées. Ces eaux sont généralement moins minéralisées (Amrani et Hinaje 2014). Ce résultat concorde avec ceux de nombreux chercheurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest, qui ont tous conclu que le faciès bicarbonaté est le plus répandu dans les eaux du socle (OUANDAOGO 2008; Sadat et al. 2011 ; Ehoussou, Kouassi, et Kamagaté 2019). La prédominance du faciès bicarbonaté dans les eaux de socle est liée à l'origine de la production des ions bicarbonates. Ces ions sont principalement générés par l'altération des silicates, qui se produit lorsque les eaux acquièrent leur charge saline dans la zone d'aération.

➤ Le faciès chloruré/nitraté calcique et magnésique

Ce faciès représente seulement que 7,15% des eaux souterraines étudiées à savoir SAABA MOSQUEE et celui de USTA. C'est le faciès le moins dominant. Les échantillons de cette nappe tendent vers le pôle du chlorure associé aux nitrates. Ce sont les eaux où l'on observe de

fortes teneurs en nitrates car en observant le diagramme de piper sans les nitrates tous les échantillons sont fixés au niveau du pôle bicarbonaté dans le triangle des anions. Ces nitrates sont fortement mis en évidence à cause de la de la mauvaise qualité des eaux éventuellement induites par des activités anthropiques(Balloy Mwanza, Katond, et Hanocq 2019).



Conclusion

La présente étude a porté sur l'évaluation de la potabilité des eaux de forages exploités par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou mais aussi sur la caractérisation chimique de ces eaux à travers une analyses statiques et le diagramme de Piper des ions majeurs.

Sur le plan physico-chimique, la plupart des caractéristiques étudiés ont présenté des valeurs qui sont conformes aux normes de l'OMS. Quelques échantillons ont montré des valeurs non conformes pour le pH c'est-à-dire des eaux plus acides, les nitrates (25% des forages), le plomb (25% des forages), le fer total (11% des forages), l'aluminium (3,57%) et l'arsenic (7,17%). Sur le plan microbiologique, quelques échantillons sont contaminés par plusieurs germes. On note la présence des germes totaux dans 65% des échantillons. Les coliformes totaux, fécaux et les bactéries *E. coli* sont présentent dans 25% des échantillons. Les streptocoques fécaux quant à elles sont présentes dans un seul échantillon à savoir ZONGO SE 02.

En prenant en compte les paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines échantillonnées, près de 68% des forages exploités par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou produisent une eau impure à la consommation humaine.

Toutes ces anormalités constatées au niveau de ces eaux de forages sont notamment dû à la mauvaise ou le non-respect des règles d'hygiène et d'aménagement, la mauvaise conception des latrines et des fosses septiques, la mauvaise évacuation des eaux usées, les dépôts d'ordures et des boues de vidange et la mauvaise gestion de déchets industrielles.

L'ACP a conduit à la mise en évidence des différentes caractéristiques des eaux souterraines de la région. En effet, la représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques a mis en évidence trois (3) classes : la première classe regroupe des eaux fortement minéralisées avec la présence de fortes valeurs pour les bicarbonates, les sulfates, la conductivité électrique et le calcium ; ensuite la deuxième renferme les eaux faiblement minéralisées avec de faible valeurs en calcium, de magnésium et de conductivité et enfin une troisième classe qui représente les eaux moyennement minéralisé avec de forte teneurs en nitrates.

Le diagramme de piper quant à elle classifie nos échantillons en deux groupes à savoir un faciès bicarbonaté calcique magnésique et un faciès chloruré calcique magnésique. Le faciès bicarbonaté calcique représente 92,85% des échantillons et cette prédominance s'explique par la présence de minéraux silicatés qui après altération libèrent des ions bicarbonates. Le faciès chloruré/nitraté calcique et magnésique regroupe deux forages uniquement à savoir USTA et SAABA MOSQUEE qui montre que ces eaux subissent une pollution anthropique.

Cette étude a permis d'avoir une idée de la composition des eaux de forages exploités par l'ONEA dans la ville de Ouagadougou. Conscient que ses résultats ne qu'expliqué de manière générale l'état des eaux souterraines à l'échelle de la ville, une analyse spatio-temporelle devra se faire afin d'avoir une description complète des eaux souterraines. Il s'agira de réaliser une caractérisation des eaux souterraines en période de basses eaux

Recommandations

Au terme de ce travail, un certain nombre de recommandations peuvent être formulés en vue de garantir d'avantage la santé des consommateurs et améliorer la desserte en eau par le réseau de l'ONEA dans l'ensemble des zones de la capitale. Parmi ces recommandations, nous pouvons citer :

- Une désinfection adéquate de ces eaux afin de les exempter de toutes contaminations microbiennes et prévenir d'éventuels risque d'épidémies.
- Mettre en arrêt les forages dont les paramètres physico-chimique et bactériologique dépassent les directives du Burkina Faso afin d'effectuer des investigations sur les potentielles sources de pollutions. Il s'agit de :

<i>Nom</i>	<i>Contamination Chimique</i>	<i>Contamination Bactériologique</i>
<i>ZINGERSSE SE 02</i>	Plomb ; Fer total	CT ; CF ; <i>E. coli</i>
<i>DAYOUBSI SE 01</i>	Plomb	
<i>BOASSA SE 04</i>	Plomb	
<i>RETENUE</i>	Plomb	CT ; CF ; <i>E. coli</i>
<i>NOWARBA SE 06</i>	Nitrates ; Plomb	
<i>USTA</i>	Nitrates ; Plomb	
<i>SAABA MOSQUEE</i>	Nitrates ; Plomb	
<i>POLOSGO</i>	Aluminium ; Plomb	
<i>Pissy SE 01</i>	Nitrates	
<i>ZONGO SE 09</i>	Nitrates	
<i>ZAGTOULI SE 03</i>	Nitrates	
<i>NIOWARBIN SE 09</i>	Nitrates	
<i>YAMTENGA SE 02</i>	Arsenic	
<i>YAMTENGA SE 12</i>	Arsenic	
<i>RIMKIETA SE 07</i>	Fe	CT ; CF ; <i>E. coli</i>

<i>SANDOGO SE 08</i>	-	CT ; CF ; <i>E. coli</i>
<i>BASSINKO SE 01</i>	-	CT ; CF ; <i>E. coli</i>
<i>NABITENGA SE 01</i>	-	CT ; CF ; <i>E. coli</i>
<i>GHOGO SE 01</i>	-	CT ; CF ; <i>E. coli</i>

Tableau III Les contaminations chimiques et bactériologiques des Différents forages

- Procéder à une étude environnementale afin de déterminer avec précision les sites de contaminations des bactéries et ensuite faire un traitement de la zone.
- Sensibilisez la population sur les dangers de leurs activités sur la qualité de l'eau
- La mise en place d'un système de veille pour assurer un suivi permanent de la qualité des eaux de forages et la maintenance des équipements ;

Références Bibliographiques

- Ahoussi, E., N. Soro, B. Y. Koffi, G. Soro, et J. Biemi. 2010.** « Origine de La Minéralisation Des Eaux Des Aquifères Discontinus Sous Couvert Forestier de La Zone Sud de La Côte d'Ivoire : Cas de La Région d'Abidjan-Agboville ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 4 (3). <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v4i3.60513>.
- Amadou, H., M. S. Laouali, et A. Manzola. 2014.** « Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de trois aquifères de la région de Tillabery: application des méthodes d'analyses statistiques multi variées ». *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, n° 20.
- Amrani, Samir, et Saïd Hinaje. 2014.** « Utilisation des analyses hydro-géochimiques et des analyses en composantes principales (ACP) dans l'explication du chimisme des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire entre Timahdite et Almis Guigou (Moyen Atlas, Maroc) ». *ScienceLib Editions Mersenne*, n° 6, 1-14.
- Asslouj, Jaouad El, Sanae Kholtei, Namira El Amrani-Paaza, et Abderrauf Hilali. 2007.** « Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc) ». *Revue des sciences de l'eau* 20 (3): 309-21.
- Awomeso, Awonusi. 1990a.** « Qualité des eaux souterraines et maladies hydriques au Nigéria ». PhD Thesis, Besançon.
- Balloy Mwanza, P., J. P. Katond, et P. Hanocq. 2019.** « Evaluation de la qualité physico chimique et bactériologique des eaux de puits dans le quartier spontané de Luwowoshi (RD Congo) ». *Tropicultura*, janvier. <https://doi.org/10.25518/2295-8010.627>.
- Belghiti, M. L., ABDELKADER CHAHLAOUI, D. Bengoumi, et R. El Moustaine. 2013.** « Etude de la qualité physico- chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc) ». *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, n° 14.
- Bourrie, Guilhem. 1976.** « Relations entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO₂ dans les eaux nature ». *Lettre de l'Association (AFES)*, n° 3, 145-59.

- Canellas, J., et B. Blavoux. 1995.** « Relations Entre Les Structures Géologiques, La Composition Chimique Des Eaux Minérales et Leurs Orientations Thérapeutiques ». *La Houille Blanche* 81 (2-3): 81-86. <https://doi.org/10.1051/lhb/1995019>.
- DESBORDES, Aurélie. 2000.** « POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES EN PICARDIE ». 2000. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/duée/desborde/desborde.htm>.
- Detay, Michel. 1993.** « Le forage d'eau. Réalisation, entretien, réhabilitation. Chapitre VII - Réhabilitation des forages ». In , 281-323.
- Dos Santos, Stéphanie, et Madeleine Wayack Pambè. 2016.** « Les Objectifs du Millénaire pour le développement, l'accès à l'eau et les rapports de genre ». *Mondes en développement* 174 (2): 63-78. <https://doi.org/10.3917/med.174.0063>.
- Ehoussou, Kouamé Marcousse, Amani Michel Kouassi, et Bamory Kamagaté. 2019.** « Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du béliér, centre de la Côte d'Ivoire ». *Rev. Ivoir. Sci. Technol* 33:137-60.
- Fouché, Olivier. 2013.** « Aquifères, nappes et essais d'eau. » In , 725-848.
- HIE, Missa. 2009.** *Etude géochimique et piézométrique des eaux souterraines de la région de Ouagadougou*.
- Kahoul, M., et M. Touhami. 2014.** « Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de consommation de la ville d'Annaba (Algérie) ». *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, n° 19.
- Karambiri, BLCN, et Raogo Noël Gansaonre. 2023. « Variabilité Spatio-temporelle de la Pluviométrie dans les Zones Climatiques du Burkina Faso: Cas de Bobo-Dioulasso, Ouagadougou et Dori ». *European Scientific Journal, ESJ* 19 (9): 262.
- « **La suppression du chlorure de l'eau** ». s. d. PA-FR-Live. Consulté le 20 juin 2024. <https://fr.pureaqua.com/la-suppression-du-chlorure-de-leau/>.
- Loup, Jean. 1965.** « Schoeller (H.).—Les eaux souterraines. » *Revue de Géographie Alpine* 53 (4): 699-700.

- Mahamane, A. Ayouba, et Boubié Guel. 2015.** « Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 9 (1): 517-33.
- Ministère de l'Eau et de l'Assainissement. 2020.** « Programme Approvisionnement en Eau Potable ». Ministère de l'Eau et de l'Assainissement. 2020. <https://www.mea.gov.bf/projets-et-programmes/eau-potable>.
- Mounjid, Jihad, S. Fadlaoui, et A. Belhouari. 2014.** « Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique du cours d'eau Merzeg (périurbain de Casablanca, Maroc) ». *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, n° 18.
- MOUSSA NOMAO, Ibrahimou. 2017.** *Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux des forages à usage particulier et semi-industriels à Ouagadougou (Burkina Faso)*.
- Olivier, Atteia. 2015.** *Chimie et pollutions des eaux souterraines*. Lavoisier.
- Organisation mondiale de la Santé. 2017.** « Directives de qualité pour l'eau de boisson: 4e éd. intégrant le premier additif ».
- OUANDAOGO, Suzanne, et S. Yameogo. 2008.** « RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DU CENTRE URBAIN DE OUAGADOUGOU AU BURKINA FASO QUALITE ET VULNERABILITE ». PhD Thesis, Université d'Avignon.
- RODIER, Jean, Bernard LEGUBE, et Nicole MERLET. 2009.** *L'analyse de l'eau*. 9è Ed. entièrement mise à jour. Paris: Dunod.
- Sadat, A. W., Essan Bla Zita N'goran, Sorho Siaka, et Bernard Parinet. 2011.** « Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical: cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) ». *Journal of Applied Biosciences* 38:2573-85.
- Sawadogo, Adama, Cissé Hama, François Tapsoba, Boureima Kagambega, Zongo Oumarou, Laurencia Ouedraogo, Zongo Cheikna, et Aly Savadogo. 2023.** « Evaluation de la qualité des eaux de forage de la commune de Ouagadougou, Burkina Faso Assessment of the quality of borehole water in the municipality of Ouagadougou ».

International Journal of Biological and Chemical Sciences 17 (octobre):2550-63.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v17i6.32>.

SECK, Mansour. 1997. *Etude et représentation cartographique de la qualité chimique des eaux souterraines au Burkina Faso.*

UNESCO. 2020. « Eau potable ». 21 septembre 2020. <https://uis.unesco.org/fr/glossary-term/eau-potable-0>.

Annexes

Annexe 1 Résultats des analyses physico-chimique des échantillons d'eaux des forages .	xi
Annexe 2 Résultats des analyses des éléments traces chimique des échantillons d'eaux des forages	xiii
Annexe 3 Bilan Ionique.....	xvi
Annexe 4 Normes de qualité de l'eau potable au BURKINA FASO (Directives de l'OMS)	xvii
Annexe 5 Coordonnées géographiques des forages.....	xix
Annexe 6 Méthode de dosage volumétrique	xx
Annexe 7 Méthode d'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.	xxii

Annexe 1 Résultats des analyses physico-chimique des échantillons d'eaux des forages

<i>Nom</i>	<i>T</i> (°C)	<i>pH</i>	<i>Cond</i> ($\mu\text{s/cm}$)	<i>TAC</i> (°f)	<i>TH</i> (°f)	<i>Ca²⁺</i> (mg/L)	<i>Mg²⁺</i> (mg/L)	<i>Cl⁻</i> (mg/L)	<i>Na⁺</i> (mg/L)	<i>K⁺</i> (mg/L)	<i>SO₄²⁻</i> (mg/L)	<i>PO₄³⁻</i> (mg/L)	<i>NO₃⁻</i> (mg/L)	<i>NO₂⁻</i> (mg/L)	<i>F</i> (mg/L)
<i>Qp 99</i>	31,7	6,376	246	8,2	18,2	38,4	20,64	2,84	2,34	3,19	11	0,66	18,4	0,026	0,27
<i>Pissy SE 01</i>	31,1	6,939	298	6,5	19,2	42,4	20,64	1,42	0,63	2,80	3	0,74	55,2	0,023	0,2
<i>ZONGO SE 02</i>	31,8	6,737	412	15,9	33,2	83,2	29,76	4,26	2,35	2,32	18	0,54	44,2	0,019	0,5
<i>ZONGO SE 09</i>	31,8	6,343	318	8,6	27	44	38,4	4,26	4,46	2,64	3	0,22	75,1	0,01	0,37
<i>ZAGTOULI SE 06</i>	31,9	6,747	255	7,5	22,8	36	33,12	8,52	1,79	2,32	3	0,96	30,7	0,014	0,39
<i>ZAGTOULI SE 03</i>	32	6,807	227	9,7	19,8	53,6	15,36	3,55	2,11	1,83	0	0,84	107,6	0,036	0,45
<i>SANDOGO SE 04</i>	32,2	6,7	303	13,1	25,4	76	15,36	4,26	2,68	2,60	8	0,62	7,8	0,021	0,35
<i>SANDOGO SE 08</i>	31,1	7,169	301	13,5	24,2	72	14,88	11,36	0,00	3,08	6	0,71	2,5	0,027	0,43
<i>ZAGTOULI SE 05</i>	30,8	7,131	347	13,1	29,4	88	17,76	1,42	3,93	2,52	41	0,55	3	0,028	0,36
<i>SANDOGO SE 06</i>	31	6,758	240	11,2	19,2	56	12,48	0,71	3,25	2,53	0	0,46	5,5	0,012	0,37
<i>BOASSA SE 07</i>	31	6,748	297	15,6	25,8	64	23,52	1,065	10,93	1,97	0	0,79	2,9	0,014	0,17
<i>RIMKIETA SE 07</i>	31,5	5,945	318	9,3	22,4	59,2	18,24	7,1	3,88	1,89	5	0,81	23,8	0,027	0,24
<i>BASSINKO SE 09</i>	31,6	7,372	233	11,6	15,4	56	3,36	2,84	3,11	2,19	0	0,27	5,6	0,018	0,44
<i>ZINGERSSE SE 02</i>	32,3	6,776	218	10,4	19	59,2	10,08	1,065	0,60	2,35	1	0,54	11,5	0,028	0,4
<i>NABITENGA SE 01</i>	30,7	6,419	183,8	7,7	13,2	35,2	10,56	5,68	7,55	2,77	0	0,19	7,1	0,029	0,31
<i>DAYOUBSI SE 01</i>	31,7	6,4	174	7,8	14,2	32	14,88	0,71	4,90	2,60	0	0,78	9	0,038	0,16
<i>GHOGO SE 01</i>	31,2	7,68	156,6	8,1	11,6	25,6	12,48	1,42	6,01	1,49	0	0,65	2,6	0,035	0,44
<i>BOASSA SE 04</i>	31,7	8,069	235	9,7	19,4	49,6	16,8	5,68	2,32	2,25	0	0,46	13,9	0,042	0,41

<i>MARKOUSSI SE 05</i>	31,1	6,5	224	5,9	34	68,8	40,32	0,71	6,44	1,88	1	0,68	31,9	0,045	0,04
<i>POLOSGO</i>	31,6	7,45	362	9,4	43,2	67,2	63,36	1,42	12,18	2,89	9	0,26	39,8	0,024	0,17
<i>NOWARBA SE 06</i>	30,8	6,28	188,2	5	27,6	40	42,24	1,491	6,95	2,36	1	1,13	54,7	0,016	0,39
<i>NIOWARBIN SE 09</i>	32,1	6,07	356	9,7	50,8	104	59,52	0,852	3,40	2,20	0	0,44	94,4	0,04	0,28
<i>USTA</i>	32,9	5,8	220	3,9	28,8	65,6	29,76	2,627	2,88	2,93	1	0,92	168,5	0,051	0,38
<i>RETENUE</i>	33,1	6,01	193,3	5,1	33,2	62,4	42,24	0,355	5,75	3,09	0	0,17	34,5	0,028	0,18
<i>SAABA MOSQUEE</i>	32	6,62	240	4,6	30	57,6	37,44	4,402	1,43	2,89	3	0,28	94,4	0,035	0,27
<i>YAMTENG SE 04</i>	30,9	7,09	267	6,6	36	73,6	42,24	7,668	2,44	2,69	2	0,64	22,1	0,016	0,25
<i>DJIKOFE</i>															
<i>YAMTENG SE 02</i>	31,8	7,05	217	6	30,4	62,4	35,52	0,923	2,22	1,55	0	0,16	33,7	0,023	0,26
<i>YAMTENG SE 12</i>	30,9	6,94	219	5,5	27,6	70,4	24	1,349	1,83	1,86	1	1,02	24,4	0,03	0,08

Annexe 2 Résultats des analyses des éléments traces chimique des échantillons d'eaux des forages

<i>Nom</i>	<i>Ag</i>	<i>Al</i>	<i>As</i>	<i>Cd</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>Pb</i>
	mg/L										
Qp 99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00720839
Pissy SE 01	0	0	0,00045827	0	0	0	0,02806327	0	0	0	0,00721131
ZONGO SE 02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00937732
ZONGO SE 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00421721
ZAGTOULI SE 06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00657587
ZAGTOULI SE 03	0	0	0,00142523	0	0	0	0,00099333	0	0	0	0,00609424
SANDOGO SE 04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000190054	0,00803673
SANDOGO SE 08	0	0	0,00172517	0	0	0	0	0	0	0	0,00875891
ZAGTOULI SE 05	0	0	0	0	0	0	0,03342208	0	0	0	0,00619979
SANDOGO SE 06	0	0	0	0	0	0	0,00020387	0	0	0	0,00845024
BOASSA SE 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00718257
RIMKIETA SE 07	0	0	0	0	0	0	0	2,60995E-05	0	0	0,00892815
BASSINKO SE 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00495802

ZINGERSSE SE 02	0	0	0	0	0	0	0,00371791	0,04289768	0	0	0,01238419
NABITENGA SE 01	0	0	0	0	0	0	0,00721203	0	0	0	0,00481859
DAYOUBSI SE 01	0	0	0	0	0	0	0	0,011755009	0	0,000611755	0,0101309
GHOGO SE 01	0	0	0	0	0	0	0,00340064	0	0	0	0,00753381
BOASSA SE 04	0	0	0,00362953	0	0	0	0	0	0	0	0,01016602
MARKOUSSI SE 05	0	0	0	0	0	0,00132956	0	0	0	0	0,00962532
POLOSGO	0	0,29453203	0,00076745	0	0	0	0,01090746	0,043181422	0,00575478	0,001277621	0,01872575
NOWARBA SE 06	0	0	0,00101196	0	0	0	0	0,007268666	0	0,001154681	0,01194566
NIOWARBIN SE 09	0	0	0	0	0	0,01121594	0	0	0	0	0,00801066
USTA	0	0	0	0	0	0	0,00530415	0,024959557	0,29366858	0	0,02633712
RETENUE	0	0	0	0	0	0	0,00231431	0	0	0	0,00862001
SAABA	0	0	0,00179046	0	0	0,00068129	0,0295564	0	0	0	0,01692163
MOSQUEE											
YAMTENGA SE 04 DJIKOFE	0	0	0,00586667	0	0	0	0,00252032	0,041760887	0	0	0,024128

YAMTENGASE 02	0	0	0,01416384	0	0	0	0	0	0	8,60943E-05	0,0212776
YAMTENGASE 12	0	0	0,01763176	0	0	0,00048834	0	0	0,01004467	0,000538901	0,03191446

Annexe 3 Bilan Ionique

Nom	Cations[meq]	Anions[meq]	BI (%)
Qp 99	3,80	2,28	25
Pissy SE 01	3,92	2,33	25
ZONGO SE 02	6,77	4,43	21
ZONGO SE 09	5,62	3,14	28
ZAGTOULI SE 06	4,66	2,35	33
ZAGTOULI SE 03	4,08	3,83	3
SANDOGO SE 04	5,24	3,07	26
SANDOGO SE 08	4,90	3,23	21
ZAGTOULI SE 05	6,09	3,60	26
SANDOGO SE 06	4,03	2,38	26
BOASSA SE 07	5,66	3,23	27
RIMKIETA SE 07	4,70	2,59	29
BASSINKO SE 09	3,26	2,52	13
ZINGERSSE SE 02	3,94	2,35	25
NABITENGA SE 01	3,03	1,84	24
DAYOUBSI SE 01	3,10	1,76	28
GHOGO SE 01	2,61	1,75	20
BOASSA SE 04	4,02	2,36	26
MARKOUSSI SE 05	7,08	1,76	60
POLOSGO	9,21	2,77	54
NOWARBA SE 06	5,84	2,00	49
NIOWARBIN SE 09	10,30	3,52	49
USTA	5,93	3,64	24
RETENUE	6,93	1,60	62
SAABA MOSQUEE	6,11	2,65	39
YAMTENGA SE 04 DJIKOFE	7,32	1,97	58
YAMTENGA SE 02	6,17	1,79	55
YAMTENGA SE 12	5,62	1,59	56

Annexe 4 Normes de qualité de l'eau potable au BURKINA FASO (Directives de l'OMS)

Paramètre	Norme
Germes totaux	Absence dans 100 ml
Coliformes totaux	Absence dans 100 ml
Coliformes fécaux	Absence dans 100 ml
E. coli	Absence dans 100 ml
Streptocoques fécaux	Absence dans 100 ml
pH	6,5 - 8,5
Température	Conforme à l'ambiante
Turbidité	< 5 NTU
Conductivité électrique	< 1000 µS/cm
Calcium	< 200 mg/l
Magnésium	< 150 mg/l
Chlorures	< 250 mg/l
Nitrates	< 50 mg/l
Nitrites	< 0,1 mg/l
Sodium	< 200 mg/l
Potassium	< 12 mg/l
Sulfates	< 200 mg/l
Phosphate	<12
Ammoniac	<1,5 mg/l
Fluorures	< 1,5 mg/l
Fer Total	<0,3 mg/l

Paramètre	Norme
Argent	< 5 µg/L
Aluminium	< 200 µg/L
Arsenic	< 10 µg/L
Cadmium	< 3 µg/L
Cobalt	-
Nickel	< 70 µg/L
Manganèse	< 500 µg/L
Cuivre	< 2000 µg/L
Zinc	< 500 µg/L
Chrome	< 50 µg/L
Plomb	< 10 µg/L

Annexe 5 Coordonnées géographiques des forages

<i>Nom</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
Qp 99	-1,5475949	12,3440585
Pissy SE 01	-1,5759367	12,3428083
ZONGO SE 02	-1,5917445	12,3448413
ZONGO SE 09	-1,6093596	12,3428357
ZAGTOULI SE 06	-1,6263583	12,32767
ZAGTOULI SE 03	-1,6263583	12,32767
SANDOGO SE 04	-1,6063341	12,3173277
SANDOGO SE 08	-1,6096086	12,3224845
ZAGTOULI SE 05	-1,6127815	12,3199922
SANDOGO SE 06	-1,6184924	12,3127002
BOASSA SE 07	-1,6262602	12,2983402
RIMKIETA SE 07	-1,5863667	12,370205
BASSINKO SE 09	-1,6497266	12,4153093
ZINGERSSE SE 02	-1,5879769	12,2516602
NABITENGA SE 01	-1,60658	12,2526083
DAYOUBSI SE 01	-1,6094015	12,2454991
GHOGO SE 01	-1,6373717	12,238205
BOASSA SE 04	-1,6140651	12,2884667
POLOSGO	-1,5053083	12,4391267
NOWARBA SE 06	-1,43473	12,43909
NIOWARBIN SE 09	-1,4308783	12,4471217
USTA	-1,41663	12,3797067
RETENUE	-1,4224233	12,3614884
SAABA MOSQUEE	-1,4257833	12,3594017
YAMTENGA SE 04 DJIKOFE	-1,4460633	12,3430853
YAMTENGA SE 02	-1,44236	12,3360483
YAMTENGA SE 12	-1,4363283	12,3324767

Annexe 6 Méthode de dosage volumétrique

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

❖ Méthode de dosage du TA et TAC

Si le pH de l'échantillon est supérieur à 8,3, alors le TA est à déterminer. Le TA est obtenu par la méthode suivante : dans 100mL d'échantillon ajouter 2 à 3 gouttes de solution phénolphthaléine le tout doser à l'acide chlorhydrique (HCl) à 0,02N ; le virage passe du rose au bleu. Le volume de HCl pipete est multiplié par 0,2 pour obtenir la teneur de TA dans l'eau de boisson.

Si après l'ajout de la phénolphthaléine la couleur de l'échantillon est restée tel quel, alors le TA est nul et on peut passer au dosage du TAC. Alors pour le dosage du TAC, ajouter à l'échantillon 2 à 3 gouttes de l'indicateur mixte (vert de bromocrésol et rouge de méthyle) et doser avec l'acide chlorhydrique (HCl) à 0,02N. Le virage passe du bleu au vert claire.

$$TAC (^{\circ}f) = 5 \times 1000 \times \frac{C_{HCl} \times V_{HCl}}{V_{ech}}$$

$$TAC (meq/L) = 0.2 \times TAC (^{\circ}f)$$

❖ Méthode de dosage du TH

Mettre 100 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 dosé avec de l'EDTA (sel disodique d'acide Ethylène Diamine Tétracétique). Le virage passe du rose au bleu. Le TH est obtenu en multipliant le volume de l'EDTA pipeté par 0.2. Le résultat est exprimé en mmol/L.

$$TH (meq/L) = 1000 \times \frac{C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{V_{ech}}$$

$$TH (mg/L [CaCO_3]) = 100 \times TH (meq/L)$$

$$TH (°f) = 10 * TH (meq/L)$$

❖ Méthode de dosage du Calcium

Une fois le TH obtenu la concentration en calcium est déterminé en prélevant 100ml de l'échantillon, en ajoutant 2 pincés d'acide calcone et de 12mL de NaOH, ensuite déposée la solution sur l'agitateur et doser à l'EDTA. Le virage passe du violet au bleu.

$$TCa (meq/L) = 1000 \times \frac{C_{EDTA} \times V_{EDTA}}{V_{ech}}$$

$$TCa (mg/L) = 40 \times TCa (meq/L)$$

$$TCa (°f) = 10 * TCa (meq/L)$$

Pour déterminer la valeur en magnésium de l'échantillon en degré français :

$$T_{Mg}(°f) = TH(°f) - T_{Ca}(°f)$$

$$T_{Mg}(mg/L) = 2.4 \times T_{Mg}(°f)$$

Annexe 7 Méthode d'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques

Turbidité (Aspect)	NF EN ISO7027 (T 90-033)
Conductivité	NF EN 27888 (T 90-031)
Ph	NF T 90-008
Chlorures	NF EN ISO 10304-1 (T 90-042) / NF T 90-014)
Sulfates	NF EN ISO 10304-1 (T 90-042) / NF T 90-040)
Nitrates	NF EN ISO 10304-1 / NF EN ISO 13395 / N.T.09.30
Nitrites	NF EN ISO 10304-1/ NF EN ISO 13395 / NF EN 26777
Fluor	NF EN ISO 10304-1 (T 90-042) / NF T 90-004
Ortho phosphates	NF EN ISO 10304-1 / NF EN 1189
Carbonates	NF EN ISO 9963-1 (T 90-036)
Bicarbonates	NF EN ISO 9963-1 (T 90-036)
Dureté Totale (TH)	NF T 90-003
Calcium	NF EN ISO 14911 / NF T 90-016 / NF EN ISO 7980
Magnésium	NF EN ISO 14911 / NF EN ISO 7980
Sodium	NF EN ISO 14911 / NF T 90-020 / NF T 90-019
Potassium	NF EN ISO 14911 / NF T 90-020 / NF T 90-020
Fer Total	NF T 90-017 / FD T 90-112
Manganèse	NF EN ISO 14911 / FD T 90-112
Cuivre	FD T 90-112
Aluminium	FD T 90-119 /
Arsenic	FD T 90-119 / NF EN ISO 11969 / N F E N 26595
Zinc	FD T 90-112

Coliformes Totaux	NF EN ISO 9308- 1 (2000)
Coliformes Fécaux	NF EN ISO 9308- 1 (2000)
Streptocoques Fécaux	NF EN ISO 7899-2 (2000)
Germes Totaux À 37°C	NF EN ISO 6222