UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Etude de la qualité physicochimique et microbiologique de leau de forage des zones de Kamenge, Ngagara et Gihanga au Burundi

Bayubahe, Fabiola; Sous la direction de : Directeur : Pr. Dr. Ir. Niyukuri Jonathan; Co-directeur : Msc. Ndikumasabo Ezéchiel

2026-06
UB, EANSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2444

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

EAST AFRICAN NUTRITIONAL SCIENCES INSTITUTE (EANSI)

MASTER EN SCIENCE DES ALIMENTS ET NUTRITION

ETUDE DE LA QUALITE PHYSICOCHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DE L'EAU DE FORAGE DES ZONES DE KAMENGE, NGAGARA ET GIHANGA AU BURUNDI

Par:

BAYUBAHE Fabiola

Mémoire

présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention d'un Diplôme de Master en Science des Aliments et Nutrition

Option : Technologie et Qualité des Aliments

Sous la direction de :

Directeur : Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan

Co-directeur : Msc. NDIKUMASABO Ezéchiel

Bujumbura, Juin 2026

MEMBRES DU JURY

Président : Pr. Dr. Ir. KAKANA Pascal

Directeur : Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan

Co-directeur : Msc. NDIKUMASABO Ezéchiel

Secrétaire : Dr. NSHIMIRIMANA Sylvestre

DEDICACE

A Dieu le Tout Puissant ;

A mes regrettés parents ;

A mon cher époux ;

A mes enfants ;

A mes frères et sœur ;

A tous mes amis et connaissances.

Je dédie ce mémoire

REMERCIEMENTS

Nous remercions très vivement nos parents qui nous ont montré le chemin de l'école. Nos remerciements s'adressent respectivement aux Pr. Dr. Ir. NIYUKURI Jonathan et Msc. NDIKUMASABO Ezéchiel, Directeur et Co-directeur de ce mémoire, ils nous ont fait grand honneur d'accepter de diriger ce mémoire malgré ses multiples responsabilités, ses précieux conseils, sont de valeur inestimable.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à tout le corps enseignant et administratif de l'EANSI pour la qualité de la formation qui nous a permis d'atteindre cette étape.

Nous exprimons notre gratitude envers notre époux bien-aimé, Dr NDAKUNINAHAZA Angélos qui s'est donné corps et âme directement ou indirectement dans la réalisation de ce travail.

Notre sincère reconnaissance s'adresse aux techniciens des laboratoires du Centre National de Technologie Alimentaire (CNTA), qui nous ont aidés dans l'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers nos oncles et tantes paternels et maternels, nos frères et sœurs.

Nous exprimons en fin notre gratitude à l'administration de la Zone Ngagara, Kamenge et Gihanga qui nous a fourni les informations indispensables pour accomplir ce travail.

RESUME

L'eau provenant du forage résultant des aquifères est naturellement fournie par l'eau de surface, à l'aide des pluies, des cours d'eau et des infiltrations. Cette ressource hydrique est susceptible d'être submergée à une contamination microbiologique et physicochimique due aux activités humaines. Le but de cette recherche est d'étudier la qualité physico chimique et microbiologique de l'eau de forage de Gihanga, Kamenge et Ngagara à Bujumbura.

Onze paramètres physicochimiques (pH, conductivité, température, turbidité, TDS, salinité, calcium, manganèse, fer, nitrates, nitrites) et six paramètres microbiologiques (coliformes totaux, coliformes fécaux, *Escherichia coli*, salmonella, Shigella, *Vibrion cholerae*) ont été étudiés pendant trois mois (Novembre 2025, Décembre 2025 et Janvier 2026) dans dix forages. Certains appareils, multi paramètres, thermomètre, photomètre, spectrophotomètre, spectrophotométrie d'absorption atomique, incubateur, bain marie, flacons, boîtes de pétri, autoclave et les milieux de cultures SSA, VRBA, TCBS ainsi que GSP ont été utilisés. Le traitement des données a été effectué grâce à l'Excel et SPSS.

Concernant les paramètres physicochimiques, la conformité aux normes de l'EAC 2022 et de l'OMS 2017 a été respectée, à l'exception de la salinité, la conductivité et les nitrites pour certaines périodes. La salinité moyenne de 0,34±0,08 ; 0,39±0,36 ; 0,35±0,0, dépasse les limites dans tous les forages. Les concentrations de la Turbidité, du fer, température, pH, calcium, manganèse, nitrates et TDS sont conformes aux normes recommandées. Les mesures de nitrites sont de 1,16±0,28 mg/l ; 1,13±0,29 mg/l ; et 1,46±0,45mg/l et sont hors normes d'après EAC 20202 fixant (> à de 0,9 mg/l. Du coté microbiologiques, tous les forages analysés ne respectent pas les normes de l'EAC et de l'OMS qui exigent 0UFC/100ml. Des valeurs moyennes de5,04±3,47UFC, 4,42±33,05 UFC ;3,74±3,44 UFC de coliformes totaux et fécaux ; de 2,25±2,89UFC ,1,31±1,03 UFC et 3,18±3,42 UFC d'Escherichia coli ;2,25±2,89 UFC ,1,31±1,03 UFC et 3,18±3,42 UFC de salmonelles et shigella ; de 2,53±2,2 UFC ;2,3±2,35 UFC et 2,78±3,01 UFC de *vibrio cholerae* respectivement dans les zones de Kamenge, Ngagara et à Gihanga.

Cette contamination met en péril l'environnement et représente un danger majeur pour la santé de ceux ou celles qui y résident. Afin d'empêcher la pollution de la nappe phréatique, il est crucial de bien aménager les forages installés, les placer dans un endroit adéquat.

Mots clés : Eaux de forage, physicochimie, microbiologie ; Kamenge, Ngagara, Gihanga.

ABSTRACT

The water from the borehole, drawn from aquifers, is naturally supplied by surface water through rainfall, streams, and infiltration. This water resource is susceptible to microbiological and physicochemical contamination due to human activity. The aim of this research is to study the physicochemical and microbiological quality of borehole water from Gihanga, Kamenge, and Ngagara in Bujumbura.

Eleven physicochemical parameters (pH, conductivity, temperature, turbidity, TDS, salinity, calcium, manganese, iron, nitrates, nitrites) and six microbiological parameters (total coliforms, fecal coliforms, Escherichia coli, Salmonella, Shigella, Vibrio cholerae) were studied over three months (November 2025, December 2025, and January 2026) in ten boreholes. Multiparameter instruments, thermometers, photometers, spectrophotometer, atomic absorption spectroscopy, incubators, water baths, flasks, Petri dishes, autoclaves, and culture media such as SSA, VRBA, TCBS, and GSP were used. Data processing was performed using Excel and SPSS. Regarding physicochemical parameters, compliance with EAC 2022 and WHO 2017 standards was achieved, with the exception of salinity, conductivity, and nitrites for certain periods. The average salinity of 0.34 ± 0.08, 0.39 ± 0.36, and 0.35 ± 0.0 exceeded the limits in all boreholes. The concentrations of conductivity, turbidity, iron, temperature, pH, calcium, manganese, nitrates, and TDS were within recommended limits. Nitrite measurements were 1.16 ± 0.28 mg/l and 1.13 ± 0.29 mg/L. and 1.46±0.45 mg/l and are outside the standards according to EAC 20202, which sets the limit at > 0.9 mg/l. On the microbiological side, all the analyzed boreholes do not comply with EAC and WHO standards, which require 0 CFU/100 ml for all parameters analyzed. Average values of 5.04±3.47 CFU, 4.42±33.05 CFU; 3.74±3.44 CFU of total and fecal coliforms; 2.25±2.89 CFU, 1.31±1.03 CFU and 3.18±3.42 CFU of Escherichia coli; 2.25±2.89 CFU, 1.31±1.03 CFU and 3.18±3.42 CFU of Salmonella and Shigella; 2.53 ± 2.2 CFU, 2.3 ± 2.35 CFU, and 2.78 ± 3.01 CFU of Vibrio cholerae at Kamenge, Ngagara, and Gihanga areas, respectively.

This contamination endangers the environment and poses a major health risk to residents. To prevent groundwater pollution, it is crucial to properly manage and locate boreholes in suitable areas.

Keywords: Borehole water, physicochemical analysis, microbiology; Kamenge, Ngagara, Gihanga.

TABLES DE MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACE ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLES DE MATIERES ..... **vi**
LISTES DES TABLEAUX ..... **x**
LISTE DES FIGURES ..... **xi**
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **xii**
AVANT-PROPOS ..... **xiii**
INTRODUCTION GENERALE **1**
1. Problématique 3
2. Questions de recherche 4
3. Hypothèses de recherche 4
4. Objectifs 5
5. Intérêt de l'étude 5
6. Limite de l'étude 5
CHAPITRE I. LA REVUE DE LA LITTERATURE **7**
I.1. Définitions 7
I.1.1. L'eau 7
I.1.2. L'eau potable 7
I.1.3. Eaux souterraines 7
I.1.4. Maladies liées à l'eau 8
I.2. Composition et répartition de l'eau sur la terre 8
I. 2.1. Source de l'eau 8
I.2.2. Le cycle de l'eau 8
I .3. Importance de l'eau 9
I .4. Le forage 10
I.4.1. Définition d'un Forage 10
I.4.2. La construction du forage 11
I.5. Mécanismes de transport des contaminants dans l'eau souterraine 11
I.6. Paramètres de la qualité de l'eau 12

I.6.1. Les paramètres organoleptiques 12
I.6.1.1. La Couleur 12
I.6.1.2. Goût et odeur 12
I.6.2. Les paramètres Physico chimiques 13
I.6.2.1. Matières en suspension 13
I.6.2.2. potentiel d'hydrogène (pH) 13
I.6.2.3. La turbidité 14
I.6.2.4. La conductivité 14
I.6.2.5. Le Total des solides dissous 14
I.6.2.6. La salinité 15
I.6.2.7. Le nitrate 16
I.6.2.8. Les nitrites 16
I.6.2.9. Le manganèse 16
I.6.2.10. Le fer 17
I.6.2.11 Le calcium 17
I.6.2.12. Magnésium 17
I.6.3. Les paramètres microbiologiques 17
I.6.3.1. Coliformes fécaux 17
I.6.3.2. Coliformes totaux 18
I.6.3.3. Escherichia coli 18
I.6.3.4. Salmonella 18
I.6.3.5. Vibrio cholerae 18
I.7. Normes microbiologiques de la qualité de l'eau 19
I.8. Pollution de l'eau 20
I.8.1. Définition d'une eau polluée 20
I.8.2. Pollution des eaux souterraines 20
I.8.2.1. La contamination chimique 20
I.8.2.2. La contamination microbiologique 21
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES 22
II.1. Présentation des zones d'étude 22
II.2. Les forages échantillonnés 24
II.3. Matériels et équipements utilisés pendant l'analyse 25
II.4. Prélèvement des échantillons d'eau à analyser 27

II.5. Les étapes de l'analyse microbiologique 28
II.5.1. Hygiène au laboratoire 28
II.5.2. Préparation des milieux de culture 29
II.5.3. Filtration de l'échantillon 30
II.5.4. Ensemencement 31
II.5.5. Incubation 32
II.5.6. Dénombrement, lecture et calcul des résultats 33
II.6. Analyse physico-chimique 34
II.6.1. Détermination du pH et TDS 34
II.6.2. Conductivité/Température/Salinité 35
II.6.3. La Température 36
II.6.4. La turbidité 36
II.6.5. Détermination des nitrates et nitrites 37
II.6.6. Dosage spectrophotométrique du Fe^{2+} 38
II.6.7. Dosage spectrophotométrique du ca^{2+} 39
II.6.8. Dosage spectrophotométrique du Mn^{2+} 41
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS 42
III.1. Analyse des paramètres physicochimiques 42
III.1.1. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la Zone Kamenge 42
III.1.2. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la zone Ngagara 43
III.1.3. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la Zone Gihanga 44
III.1.4. Les résultats du test ANOVA pour la comparaison du pH, conductivité, température, TDS, salinité, turbidité Gihanga entre les zones Kamenge, Ngagara et Gihanga 44
III.1.5. Détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites et en turbidité 49
III.2. Paramètres microbiologiques 55
III.2.1. Résultats microbiologiques de la Zone Kamenge 55
III.3. Les résultats microbiologiques d'après le test ANOVA de toutes les Zones Kamenge, Ngagara et Gihanga 56

III.3.1. Les coliformes totaux 56
III.3.2. Les coliformes fécaux 57
III.3.3. *Escherichia coli* 58
III.3.4. Salmonelles 59
III.3.5. *Vibrio cholerae* 59
III.4. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des eaux de forages dans les 7 quartiers 60
CONCLUSION 62
RECOMMANDATIONS 66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68
ANNEXES 72

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les besoins en eau du corps humain en fonction de l'âge. 10
Tableau 2: Normes de la qualité physico chimiques de l'(OMS, 2017) 19
Tableau 3: Les normes de la qualité physico chimique de l'eau de l'(EAC, 2022) 19
Tableau 4: Normes des paramètres Microbiologiques 20
Tableau 5: Germes, milieux de culture spécifiques, temps d'incubation et différentes colorations 30
Tableau 6 : Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Kamenge 43
Tableau 7: Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Ngagara 43
Tableau 8: Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Gihanga 44
Tableau 9: Résultats du test ANOVA pour la comparaison du pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité entre les zones Kamenge, Ngagara et Gihanga 48
Tableau 10 : Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Kamenge 50
Tableau 11: Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Ngagara 50
Tableau 12: Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Gihanga 52
Tableau 13: Résultats du test ANOVA pour la comparaison de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites entre les zones Gihanga Kamenge, Ngagara et Gihanga 55
Tableau 14: Concentrations microbiologiques Zone Kamenge 55
Tableau 15: Paramètres Microbiologiques Zone Ngagara 56
Tableau 16: Paramètres Microbiologiques Zone Gihanga 56

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Le cycle de l'eau (Serge, 2000).....9
Figure 2: Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et Souterraines (Kloppmann, 2011). 15
Figure 3: Présentation schématique du cycle des microorganismes pathogènes dans le système sol -eau souterraine(Majdoub et al., 2003). 21
Figure 4: Localisation géographique des forages échantillonnés dans la zone de Gihanga (Mpanda ..22
Figure 5: Localisation géographique des forages échantillonnés dans la zone de Ngagara 23
Figure 6: Localisation géographique des forages analysés dans la zone de Kamenge 23
Figure 7 : Les forages soumis à l'analyse.....25
Figure 8 : Matériels d'échantillonnage 27
Figure 9: Dispositif pour la désinfection du milieu d'analyse 29
Figure 10 : Milieux de culture préparés (De gauche à droite : SSA, VRBA, TCBS).....30
Figure 11 : Papier filtre et entonnoir pour la filtration.....31
Figure 12 : Boites de pétri ensemencées.....32
Figure 13 : Incubateur contenant les boites de pétri ensemencés.....32
Figure 14 : Bain Marie 33
Figure 15 : Dénombrement avec compteur de colonies.....34
Figure 16 : Multi paramètres 35
Figure 17 : pH-mètre.....35
Figure 18: Turbidimètre de type 2100N-HACK.....37
Figure 19: Le Kit du réactif spécifique aux ions nitrites (LCK 541) 38
Figure 20: Classification Ascendante Hiérarchique ou CAH des eaux de forages dans les 7 quartiers 61

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

CF : Coliformes Fécaux

CNTA : Centre National de Technologie Alimentaire

CT : Coliformes Totaux

DMA : Doses Maximales Admissibles

E. coli : Escherichia coli

EAC : East African Community

EANSI : East African Nutritional Sciences Institute

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique

MEAE : Ministère de l'Environnement, Agriculture et Elevage

MEEATU : Ministère de l'Eau,de l'Environnement,de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme

ml : millilitre

MSPLS : Ministère de la Santé Publique et de la Lutte contre le Sida

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

pH : potentiel d'hydrogène

Ppm : Partie par million

PVC : PolyChlorure de Vinyle

REGIDESO : Régie de la Production et Distribution d'Eau et d'Electricité

SAA : Spectroscopie d'Absorption Atomique

SSA : Salmonella Shigella Agar

TCBS : Thiosulfate Citrate Bile Saccharose

TDS : Totaux des Solides Dissous

UFC : Unité Format Colonie

UTN : Unités de Turbidité Néphelométrique.

VRBA : Violet Red Bile Agar

µS/cm : micro-Siemens par centimètre.

AVANT-PROPOS

L'eau est un élément vital pour l'homme et l'ensemble des écosystèmes. Elle constitue près de 70% du corps humain et joue un rôle fondamental dans les processus biologiques, hygiène, l'agriculture et le développement socio-économiques.

Au Burundi, l'accès à une eau potable de qualité demeure l'un des défis majeurs de la santé publique, en particuliers dans les zones urbaines et rurales à forte densité de la population.

Face à la croissance démographique et à l'insuffisance du réseau de distribution de la REGIDESO, de nombreux habitants des zones de Kamenge, Ngagara et Gihanga dépendent aux eaux de forage comme principale source d'approvisionnement en eau malgré leurs plaintes récurrentes sur l'aspect, l'odeur et le goût de l'eau. Or, ces eaux de forages sont particulièrement vulnérables aux contaminations d'origines anthropiques notamment fosses septiques mal étanchés, déchets, eaux usées, activités agricoles et industrielles.

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage pour évaluer certains paramètres physicochimiques et microbiologiques, qui pourraient être l'origine de plusieurs conséquences négatives. En effet, la consommation d'une eau de mauvaise qualité expose les populations à des risques sanitaires comme des maladies diarrhéiques.

C'est dans ce contexte que l'étude sur la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau de forages de ces zones est menée dans l'objectif de tirer des conclusions et de proposer des recommandations pour limiter des effets liés à la mauvaise qualité de l'eau.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est un élément naturel essentiel à la survie non seulement de l'humanité, mais également de toutes les espèces animales et végétales, sans oublier son importance pour l'environnement. Aucune autre substance ne peut faire office d'eau, d'où l'importance de sa protection, son traitement et sa conservation (Wided, 2019). L'eau potable doit être dépourvue de micro-organismes nuisibles et de composés chimiques à des niveaux pouvant constituer une menace pour la santé humaine (OMS, 2017) . L'eau est une ressource indispensable à la vie d'une part, elle représente la première cause de mortalité et de pathologie dans le monde d'autre part (Elyes, 2019).

Plus de 80% des maladies dans le monde sont attribuables à l'eau non potable. Chaque année, plus de 3 millions d'individus perdent la vie à travers le globe en raison de maladies liées à l'utilisation d'eau non potable, dont 90% sont des enfants âgés de moins de 5 ans (Ousmane, 2024).

Les nourrissons ,les jeunes enfants, les individus affaiblis ainsi que les personnes âgées, notamment lorsqu'elles résident dans des conditions insalubres, sont particulièrement vulnérables aux maladies transmises par l'eau (OMS, 2017)**.**

D'après les informations fournies par le Programme commun de surveillance de l'OMS et de l'UNICEF, environ 68 % des habitants de l'Afrique subsaharienne ne bénéficiaient pas d'un accès d'eau potable en 2024 ,cela indique qu'une proportion significative de la population est toujours exclue de cette ressource indispensable, la situation est particulièrement alarmante dans les régions rurales, où à peine 53 % des résidants ont accès à une source d'eau potable de base, en particulier dans les pays à faible et moyen revenu (Nations Unies, 2021).

Au Burundi, l'approvisionnement en eau potable reste insuffisant, notamment dans les zones urbaines et rurales, les réseaux publics d 'adduction d'eau ne couvrent pas l'ensemble de la population, ce qui conduit de nombreuses populations à recourir aux eaux souterraines, en particulier celles de forages comme principale source d'eau de boisson.

L'approvisionnement en eau potable et l'accès à un assainissement de base ont subi une dégradation importante en milieu rural (MEEATU , 2009). Malgré l'élaboration de politiques sociales par plusieurs nations dans le domaine de l'approvisionnement en eau, l'accès à l'eau

potable semble toujours discriminatoire et les résidents des zones les plus défavorisées peinent à s'y procurer un accès , on peut attribuer cette situation à une demande croissante en milieu urbain (Savina, 1994). La dégradation des ressources en eau souterraine à Bujumbura, est principalement due à une forte densité de population, une urbanisation rapide, l'insuffisance des systèmes d'assainissement et une gestion inappropriée des déchets. L'utilisation désordonnée des latrines, les déversements des eaux usées domestiques et les rejets des produits industriels peuvent causer une contamination microbiologique et chimique des forages.

À l'inverse, la zone Gihanga **:** il s'agit principalement d'une région rurale, caractérisée par des pratiques agricoles intensives et l'usage d'engrais et de pesticides. Ces actions entraînent des modifications climatiques et altèrent la qualité des eaux souterraines à travers le lessivage et l'infiltration de composés chimiques (Kouassi et al., 2017). L'existence de germes pathogènes dans l'eau potable représente une menace sanitaire significative, engendrant des troubles diarrhéiques, le choléra, la typhoïde et d'autres infections d'origine hydrique, notamment chez les populations vulnérables (OMS, 2017). Une proportion significative des maladies transmissibles dans les pays en développement est liée à l'utilisation d'une eau insalubre, à un assainissement inadéquat et à une mauvaise hygiène. L'usage des eaux contaminées pour la consommation alimentaire pose un risque sanitaire.

Les eaux souterraines sont traditionnellement privilégiées comme source d'eau potable parmi les différents types de ressources exploitables, car elles sont moins susceptibles d'être contaminées par des polluants que les eaux de surface (Diallo et al., 2018)**.** L'eau de la terre participe à un cycle incessant ; c'est toujours la même eau qui se convertit sous l'influence de l'énergie solaire et peut adopter trois états : liquide (mers, océans, lacs, rivières, pluie), gazeux (vapeur, nuages), solide (glace, neige) (Viland et al., 2001). L'eau, bien que renouvelable, est constamment mise en péril par diverses pollutions, notamment d'origine démographique, agricole et industrielle (Kounampo-okouo et al., 2024). L'eau peut constituer une source de contamination de tous les micro-organismes pathogènes microbiologiques associés à la consommation de produits frais telles que *Salmonella spp.*, *Shigella spp*, les souches pathogènes d*'Escherichia coli spp* (Codex Alimentarius, 2022).

Elle est employée en tant qu'élément actif, en relation directe ou indirecte avec les denrées alimentaires et les emballages, mais aussi pour les procédures d'hygiène et de désinfection dans le cadre de la transformation alimentaire (Codex Alimentarius, 2022)**.**

1. Problématique

Au Burundi, la population utilise en général l'eau de fontaine dans les milieux ruraux. Quant aux milieux urbains, et en particulier dans la ville de Bujumbura, la population utilise l'eau préalablement traitée par la Regideso ou des eaux provenant des fontaines issues des montagnes qui surplombent la ville de Bujumbura dans le Mirwa. Malheureusement cette eau ne suffit pas pour satisfaire les besoins en eau de la population urbaine.

Dans le souci de combler cette insuffisance hydrique, le gouvernement du Burundi à travers la Mairie de Bujumbura, des organismes internationaux comme « AMAZI WATER » et certains ménages ont construit des forages, sources d'eaux souterraines. Les eaux des forages utilisées par la population de Bujumbura pourraient présenter une qualité physico chimique inférieure aux normes recommandées et rendraient ces eaux impropres pour la consommation humaine.

Les études qui ont été faites sur l'eau de forage comme celle de Niyomwungere (2024) ont montré l'existence de polluants tels que les nitrates, les coliformes fécaux et le fer dans diverses zones de Bujumbura au Burundi. Ces contaminations peuvent être dues à des activités humaines mal gérées, à une insuffisance de purification de l'eau ou encore à la présence de sources polluantes notamment les latrines, déchets, produits phytosanitaires. Ainsi, la question principale à se poser est de déterminer si les eaux souterraines, supposées être plus sécurisées que les eaux de surface, affichent véritablement une qualité acceptable et conforme aux standards de l'Organisation mondiale de la santé (OMS,2017). Une évaluation de la qualité physicochimique et microbiologique de cette eau s'avère donc nécessaire afin de protéger la santé des consommateurs. Celle- ci devrait se faire à travers des études pour vérifier si cette eau respecte les standards internationaux des normes de la qualité tels qu'ils ont été fixés par l'OMS.

Hélas, de telles études demeurent insuffisantes, ce qui pourrait alerter le gouvernement et la population avant qu'il ne soit trop tard.

2. Questions de recherche

Face à cette situation, on pourrait se poser les questions suivantes :

La question qui se pose est de savoir si les eaux de forages consommées par la population de Bujumbura sont exemptes des substances et microorganismes nuisibles pour la santé humaine ?

1. Quelle est la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau de forage de Kamenge, Ngagara à Bujumbura et de Gihanga à Bubanza ?
2. Les valeurs observées respectent-elles les normes de potabilité recommandées par l'EAC (2022) et (OMS, 2017) ?
3. Existe-t-il une différence significative entre la qualité de l'eau de forage dans les zones urbaines (Bujumbura) et celles rurales (Gihanga) ?

3. Hypothèses de recherche

Pour répondre à ces questions, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- H1 **:** La qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau de forage à Bujumbura est moins satisfaisante que celle observée à Gihanga, en raison d'une plus forte pression anthropique.
- H2 **:** Certaines eaux de forage dépassent les limites de potabilité fixées par l'EAC et l'OMS pour des paramètres comme les nitrates, les coliformes fécaux ou salinité.
- H3 **:** Les différences de qualité entre Bujumbura et Gihanga sont significatives.

C'est pour répondre à ces questions ci-haut posées puis de confirmer ou d'infirmer les hypothèses ci-dessus formulées que nous avons choisi pour thème : **« Etude de la qualité physico chimique et microbiologique de l'eau de forage des zones de Kamenge, Ngagara et Gihanga au Burundi** ».

4. Objectifs

L'objectif général est d'étudier la qualité Physico chimique et microbiologique de l'eau de forages des zones de Kamenge, Ngagara et Gihanga au Burundi.

Spécifiquement, nous allons **:**

- Déterminer les paramètres physico-chimiques majeurs (pH, conductivité, turbidité, nitrates, nitrites, fer, manganèse, etc.) ainsi que les éléments microbiologiques (coliformes totaux, coliformes fécaux, E. coli) de l'eau des forages examinés.
- Comparer les résultats obtenus dans les zones de Bujumbura et de Gihanga.
- Examiner la conformité des eaux examinées en fonction des critères de potabilité établis par l'OMS.

5. Intérêt de l'étude

Elle servira de référence pour des recherches futures et pour l'instauration d'un contrôle régulier de la qualité des eaux souterraines à l'échelle nationale. Ainsi, l'évaluation comparative de la qualité physico-chimique et microbiologique de l'eau des forages dans ces deux milieux urbain et rural apparaît nécessaire pour déterminer le niveau de conformité de ces eaux aux normes de potabilité et pour proposer des mesures de gestion et de protection des ressources en eau.

6. Limite de l'étude

Cette étude se penchait sur les paramètres physico-chimiques et microbiologiques dans le sens d'évaluer la qualité de l'eau des forages de la ville de Bujumbura et ses environs en particulier les villages de la zone Gihanga en commune Mpanda. Concernant les paramètres physicochimiques, onze paramètres ont été étudiés notamment le pH, les solides dissous totaux (TDS), la turbidité, la température, la conductivité électrique, le calcium, le manganèse, la salinité, le fer, les nitrates, et les nitrites.

Quant aux paramètres microbiologiques six agents microbiens ont été analysés en l'occurrence l'*Escherichia coli, Vibrio cholerae, salmonella, shigella,* coliformes totaux et coliformes fécaux.

Il convient de signaler que l'évaluation de la qualité des eaux explorées n'a pas été complète en raison des contraintes budgétaires. En effet, les eaux de forages peuvent contenir les traces des métaux lourds et des pesticides mais ces paramètres n'ont pas fait objets de cette étude.

A côté de l'introduction, le présent mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature portant sur les ressources en eau, la qualité de l'eau potable et les études similaires réalisées en Afrique.

Le deuxième chapitre décrit les matériels et méthodes utilisés pour les prélèvements et les analyses. Le troisième chapitre est consacré à la présentation et discussion des résultats obtenus. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à la conclusion et aux recommandations.

CHAPITRE I. LA REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. Définitions

I.1.1. L'eau

L'eau est une substance liquide, transparente, sans saveur ni odeur, réfractant la lumière et susceptible de dissoudre un grand nombre de corps (Wided,2019). Elle doit par ailleurs, être limpide incolore et ne présenter aucun goût ou odeur désagréable.

L'eau est un composant crucial tant pour la vie humaine que pour les activités humaines. C'est un élément essentiel du monde minéral et organique. Elle s'implique dans toutes les activités de la vie quotidienne, y compris l'agriculture, l'industrie et les tâches domestiques, ce qui expose un élément récepteur à divers types de pollution. On la considère également comme un vecteur possible de plusieurs maladies (Amina, 2010).

I.1.2. L'eau potable

Une eau est dite potable, quand sa consommation par l'homme est sans danger pour celui-ci. Elle doit être exempte de contaminants microbiologiques, et son niveau de contaminants chimiques ne doit pas être dommageable pour la santé. L'eau potable est une eau qui ne doit pas porter atteinte à celui qui la consomme.

I.1.3. Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont les eaux que l'on trouve sous la terre dans les aquifères, formations géologiques de roches, de sables et de graviers où sont retenues des quantités d'eau importantes.

Les eaux souterraines sont reconstituées principalement par la pluie et la neige qui s'infiltrent dans le sol. Elles peuvent être extraites à la surface au moyen de pompes et de puits. L'eau souterraine présente une composition plus stable comparée à celle de l'eau de surface. La composition chimique de l'eau est dictée par la géologie du sol, étant donné qu'elle reste constamment en interaction avec le sol qui peut être stagnant ou en mouvement (Bensalah, 2021). E sont traditionnellement privilégiées comme source d'eau potable parmi les différents types de ressources exploitables, car elles sont moins susceptibles d'être contaminées par des polluants que les eaux de surface (Diallo et al., 2018).

I.1.4. Maladies liées à l'eau

Les maladies liées à l'eau sont n'importe quelles maladies causées par la consommation d'eau contaminée par des fèces animales ou humaines, qui contiennent des micro-organismes pathogènes (Elyes, 2019).

I.2. Composition et répartition de l'eau sur la terre

I. 2.1. Source de l'eau

Les eaux destinées à la consommation humaine proviennent des nappes phréatiques, ou bien des eaux douces de surface, à savoir les ruisseaux, les rivières, les fleuves, les barrages, et l'eau peut être contaminée de manière directe ou indirecte par les déjections humaines ou animales, en particulier par la contamination fécale (Hadji, 2020).

I.2.2. Le cycle de l'eau

Le cycle hydrologique, aussi appelé cycle de l'eau, désigne le mouvement constant de l'eau entre l'atmosphère et la Terre. Sous l'action des rayons du soleil, l'eau se convertit en vapeur et plus tard, lorsque la température baisse, cette vapeur d'eau se transforme en minuscules gouttes qui demeurent en suspension dans l'atmosphère pour former différents types de nuages. Les gouttes d'eau vont se condenser et grandir jusqu'à atteindre un poids critique qui entraînera leur déclin. En fonction des conditions météorologiques et des vents, l'eau se manifestera sous forme de pluie, ou de neige (Serge, 2000). Lors de ruissellement et de l'infiltration ; une partie de l'eau de pluie ruisselle pour aller remplir les lacs et les rivières, une autre s'infiltre dans le sol pour alimenter les nappes souterraines, et tous les deux finissent par se verser dans les océans et le cycle recommence (Lukonga, 2002).

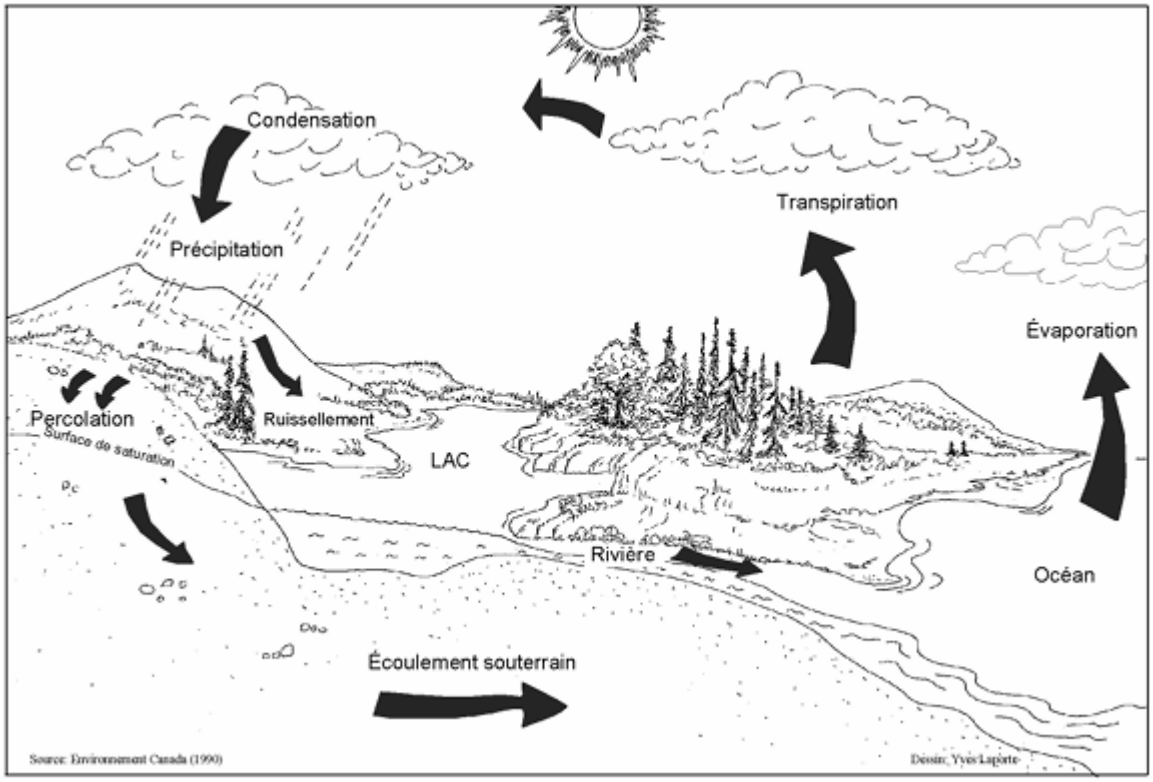


Figure 1: Le cycle de l'eau (Serge, 2000)

I .3. Importance de l'eau

L'eau constitue une ressource naturelle essentielle à la survie de l'humanité ainsi qu'à celle de chaque espèce animale et végétale sur notre planète. Aucun liquide ne peut faire office d'eau (Wided, 2019). L'eau est un élément essentiel pour la vie. Le corps d'un être humain adulte est composé de 60% d'eau et une consommation minimale de 1,5 litre d'eau par jour lui est nécessaire afin d'assurer un bon fonctionnement de ses organes. L'eau est un élément vital pour toutes les formes de vie, y compris les êtres humains, les animaux et les plantes. En plus de son importance pour la survie, l'eau est essentielle pour de nombreuses activités humaines. On peut distinguer différents types d'utilisation de l'eau. Usage domestique, usage industriel, usage agricole (Naomie,2019)**.** L'eau est indispensable à la santé humaine ; elle est un élément central du corps humain, puisqu'elle en est le principal constituant. L'eau est indispensable à l'équilibre de l'organisme. Pour compenser les pertes en eau (via l'urine, la transpiration…), nous nous hydratons à travers l'eau que nous buvons et les aliments que nous mangeons (Anne, 2020)**.**

L'eau joue un rôle essentiel dans l'organisme car assure le transport des nutriments, le transport des déchets, le drainage des reins, des poumons, de la peau, ainsi que l'assimilation des substances nutritives dans l'organisme Ndongo (2016), ainsi, le tableau 1 suivant donne les besoins du corps humain en fonction de l'âge.

Tableau 1 : Les besoins en eau du corps humain en fonction de l'âge.

Age	Fœtus de 2 mois	Nourrisson	Enfant de 5ans	Femme adulte	Homme adulte	Personne âgée
Besoin (%)	97	75	65	60	60	55

La quantité d'eau dans le corps humain varie d'une personne à une autre selon plusieurs facteurs (corpulence, âge et sexe notamment) et représente environ 60% du poids d'un individu.

I .4. Le forage

Pour avoir une eau de meilleure qualité, il faut atteindre les nappes plus profondes. La construction d'un puits de grand diamètre serait alors très coûteuse. On réalise plutôt un trou de petit diamètre, qui sera suffisamment profond pour atteindre une nappe profonde. Il s'agit d'un forage, il est réalisé avec une machine spéciale, la sondeuse ou foreuse (Kouassi, 2021).

I.4.1. Définition d'un Forage

Forage : Toute ouverture, qu'elle soit naturellement ou artificiellement modifiée, par laquelle l'eau souterraine est explorée ou à travers laquelle cette eau s'écoule naturellement sous pression ou est délibérément extraite ou injectée (Stephen et al., 2014). Les eaux souterraines sont généralement de meilleure qualité physico-chimique et microbiologique que les eaux de surface car elles sont protégées de la pollution.

I.4.2. La construction du forage

La mise en place d'un forage pour l'eau potable de façon appropriée nécessite une analyse préalable du sol et des nappes souterraines, suivie d'un forage mécanique ou manuel ajusté afin de toucher l'aquifère sans risque de contamination. Pour prévenir l'écroulement des parois et garantir la stabilité de la structure, il est crucial de procéder à l'installation d'un tubage (en PVC ou en acier). Ensuite, il faut établir un massif filtrant (à base de gravier) autour des crépines pour bloquer l'entrée de particules fines et optimiser la qualité de l'eau.

Après l'exécution du forage, il est indispensable d'effectuer des démarches de nettoyage et de désinfection pour supprimer les impuretés et les agents pathogènes. Pour terminer, la mise en place d'une margelle étanche et d'un drainage, ainsi que l'installation d'une pompe appropriée, garantissent une protection à long terme de la ressource contre toute contamination. Ces méthodes sont considérées comme indispensables pour assurer la pérennité et l'excellence de l'eau potable dans les installations de captage (Hermann, 2006).

Critères d'implantation à respecter (MINAGRI, 2015).

Ainsi ;

Le forage doit avoir une distance supérieure à :

- **200 m** des décharges et stockages de déchets,
- **35 m** des ouvrages d'assainissement, des bâtiments d'élevage
- **35 m** des stockages d'hydrocarbures, de produits chimiques, de produits phytosanitaires
- **35 m** si la pente de terrain est inférieure à 7% ou **100 m** si la pente de terrain est supérieure à 7 % des parcelles concernées par les épandages de boues issues de traitement des eaux usées urbaines ou industrielles.

I.5. Mécanismes de transport des contaminants dans l'eau souterraine

Les eaux souterraines, généralement à l'abri de la contamination, sont localisées sous le sol et leurs caractéristiques peuvent éventuellement évoluer au fil du temps (Messikh, 2020). Les eaux souterraines font référence à toutes les eaux localisées en dessous de la surface du sol, dans la zone de saturation où elles sont en contact direct avec le sous-sol.

Ces dernières se caractérisent par une turbidité faible et bénéficient d'un processus naturel de filtration important ; elles affichent aussi une contamination bactérienne très basse, étant généralement exemptes de pollution (Kouassi, 2021).

L'eau souterraine au cours de son séjour et de son circuit dans les formations géologiques perméables, subit des échanges géochimiques avec celles-ci. Les interactions eau-roche modifient les caractéristiques de l'eau (Essouli, 2024). Ainsi, les caractéristiques physico-chimiques sont modifiées, entre autres, par la composition chimique et minéralogique des sols traversés.

I.6. Paramètres de la qualité de l'eau

L'évaluation de sa qualité repose sur des paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique, teneur en solides dissous totaux, concentrations en ions majeurs notamment fer, manganèse, nitrates et nitrites ainsi que sur des paramètres microbiologiques (coliformes totaux et fécaux, *Escherichia coli*, salmonella, shigella qui influencent directement sa potabilité et la santé communautaire. La comparaison des valeurs mesurées avec des normes de l'EAC (2022) et celles de l'OMS (2017), permet de déterminer si l'eau est adaptée à la consommation humaine.

I.6.1. Les paramètres organoleptiques

I.6.1.1. La Couleur

Idéalement, l'eau de boisson ne devrait pas avoir de coloration manifeste. La coloration de l'eau de boisson est habituellement due à la présence de matière organique colorée surtout des acides humiques associés à la fraction humique du sol. La coloration est également fortement influencée par la présence de fer et d'autres métaux, qu'il s'agisse d'impuretés naturelles ou de produits de corrosion. Elle peut également résulter de la contamination de la source d'eau par des effluents industriels et peut être le premier indice d'une situation dangereuse.

I.6.1.2. Goût et odeur

L'eau potable doit avoir un goût et une odeur « non désagréables ». La plupart des eaux, qu'elles soient traitées ou non, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont un goût particulier. Ces deux propriétés purement sensorielles sont très subjectives et nous ne disposons d'aucun équipement pour les mesurer (Naomie, 2019). Ainsi, le consommateur est très sensible à toute dégradation organoleptique de l'eau dans le réseau.

Malheureusement, le goût et l'odeur sont les caractéristiques les plus difficiles à maîtriser en raison des multiples causes et interactions, telles que : la nature de la ressource, le traitement, le réseau, la microbiologie.

I.6.2. Les paramètres Physico chimiques

I.6.2.1. Matières en suspension

Les matières en suspension comprennent toutes les particules minérales ou organiques insolubles dans l'eau. Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes de l'eau.

Les matières en suspension peuvent accumuler des quantités élevées de matières toxiques notamment les métaux, pesticides, huiles minérales, et les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Ce sont des éléments qui interviennent dans la coloration et la turbidité de l'eau (Naomie, 2019).

I.6.2.2. potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH est une mesure de l'activité des ions H^+ contenus dans une eau : pH = -Log[$H3O^+$] (Hadj, 2020). Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire la concentration en ion hydronium (H^+). Les zones très calcaires se caractérisent par une capacité tampon de l'eau élevée et un pH d'environ 8,3.M (Berne, 2010). Pour une désinfection optimale au chlore, il est préférable que le pH soit inférieur à 8. Toutefois, une eau avec un pH plus bas risque d'être plus corrosive (Kouassi, 2021). Le pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité (Ouafa & Randa, 2018) .Une eau considérée comme douce (< 8°TH) et acide (pH < 6,5) est qualifiée d'agressive, car elle peut entraîner la corrosion des tuyaux et la libération potentielle de niveaux élevés de plomb, cuivre et fer (Magdélina, 2022). Le pH de l'eau indique son état d'acidité et d'alcalinité(basicité)**.** Ainsi, l'eau potable doit avoir un pH relativement neutre (6,5<pH>8,5).

En effet, l'eau acide étant corrosive, il a été montré qu'elle peut dissoudre des métaux présents dans les canalisations, comme le plomb ou le cuivre ce qui est susceptible d'entraîner une contamination de l'eau potable causant ainsi des problèmes graves pour la santé humaine en

l'occurrence les troubles neurologiques, les atteintes rénales, l'irritation de la peau, des yeux et des muqueuses, l'érosion de l'émail dentaire ainsi que l'anémie (OMS, 2017).

I.6.2.3. La turbidité

La turbidité d'une eau est la mesure de son aspect plus ou moins trouble (Fallou, 2024).

Elle est provoquée par des solides en suspension, comme le sable, le limon et l'argile, qui flottent dans l'eau. La lumière se réfléchit sur ces particules, ce qui donne à l'eau un aspect trouble ou sale. La turbidité se mesure en unités de turbidité néphélométries (UTN) en fonction de la méthode et du matériel utilisé (Smith, 2013).

I.6.2.4. La conductivité

La conductivité électrique est la mesure du courant conduit par les ions présents dans l'eau (Hadj, 2020). La conductivité d'une eau représente sa capacité à faire passer le courant électrique. Elle mesure sa capacité à conduire l'électricité, qui dépend de sa teneur en ions dissous (sels, minéraux, etc.). Elle s'exprime généralement en micro siemens par centimètre (µS/cm) et varie en fonction de la pureté de l'eau : elle est très faible pour l'eau distillée (< 10 µS/cm) et plus élevée pour l'eau du robinet (200 à 800 µS/cm) ou l'eau de mer.

En général, une conductivité élevée signale une minéralisation importante (présence de calcium, magnésium, sodium et autres) ; comme la plupart des minéraux sont bénéfiques en quantités appropriées, une surconcentration peut engendrer des déséquilibres électrolytiques, exacerber des maladies telles que l'hypertension ou altérer le goût de l'eau (OMS, 2017).

I.6.2.5. Le Total des solides dissous

Le TDS de l'eau, qui signifie "Total des Solides Dissous", mesure la concentration de toutes les substances solides (minéraux, sels, métaux, matières organiques) dissoutes dans l'eau, et non pas les solides en suspension visibles. Cette mesure est exprimée en parties par million (ppm) ou milligrammes par litre (mg/l).

I.6.2.6. La salinité

La salinité de l'eau est la quantité de sels dissous dans un volume d'eau donné.

La salinisation désigne une élévation excessive de la concentration en sels solubles dans le sol ou dans l'eau **(**Affect, 2021**).** La salinisation peut être due à des phénomènes naturels, comme l'intrusion d'eau saline, les inondations, certaines particularités géologiques ou encore des taux d'évaporation élevés en plus de climats arides.

L'emploi démesuré des fertilisants, les méthodes d'irrigation inappropriées ou un drainage insuffisant, entraînant l'évaporation de l'eau des champs et la rétention des sels dans le sol.

D'une façon générale, le goût de l'eau potable est jugé désagréable lorsque la concentration du sodium dépasse 200mg/l soit 0,2g/l.

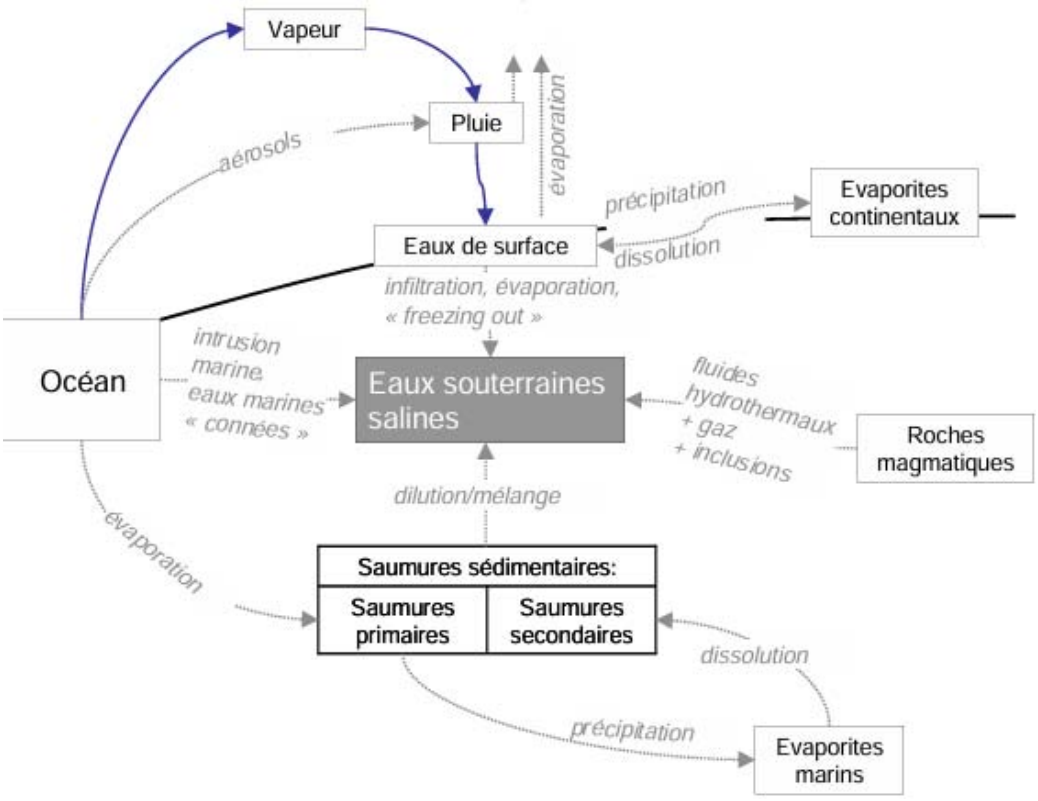


Figure 2: Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surface et Souterraines (Kloppmann, 2011).

I.6.2.7. Le nitrate

Les activités agricoles (dont l'épandage de fertilisants chimiques et de fumier d'étable, l'entreposage du fumier) ;les fosses septiques qui fuient ou dont le fonctionnement est inadéquat ; les procédés industriels ;les véhicules à moteur sont les principales sources d'azote (Ceci, 2021). Ainsi, l'exposition à des niveaux de nitrate élevés réduit la quantité d'oxygène dans le sang chez toutes personnes dont le système immunitaire est affaibli, surtout les bébés de moins de six mois ; cette maladie porte le nom de méthémoglobinémie, un bébé peut devenir bleu-gris, particulièrement autour des yeux et de la bouche, à cause du manque d'oxygène dans son sang.

I.6.2.8. Les nitrites

La présence de nitrites dans l'organisme peut conduire à l'oxydation de l'hémoglobine réduisant la capacité des globules rouges à transporter l'oxygène. Elle peut également contribuer à la formation d'autres composés, tels que les nitrosamines, dont certains sont cancérogènes.

Les sources les plus courantes de nitrate dans l'eau sont notamment les engrais chimiques employés pour améliorer la croissance des cultures ;les déchets d'origine animale provenant de lieux d'entreposage de fumier ; le fumier répandu dans les champs ; les déchets d'origine humaine provenant de champs d'épuration, ou de fosses septiques ou de cuves de rétention non étanches (Elyes, 2019). Les nitrites sont des puissants oxydants qui ont la capacité de de transformer l'hémoglobine en méthémoglobine, rendant le sang incapable de transporter l'oxygène jusqu'aux tissus.

I.6.2.9. Le manganèse

C'est un métal de teinte gris-blanc. Le manganèse trouve son origine dans diverses sources artificielles, notamment les rejets industriels. En réalité, lorsque la concentration dépasse 0,02 mg/l, le manganèse peut laisser des marques sur les habits lavés et les appareils ménagers taches de couleur noire ; altérer le flaveur amer et métallique, la teinte jaunâtre et l'arôme de l'eau (Helene, 2021). Le manganèse a plusieurs origines artificielles, notamment les rejets industriels.

Une concentration élevée de manganèse dans l'eau potable peut provoquer chez les consommateurs divers inconvénients tels que des colorations, ou des saveurs, odeurs indésirables et même la cirrhose hépatique chez l'homme (Kouassi, 2021).

I.6.2.10. Le fer

Le fer, souvent associé au manganèse dans les ressources d'eau profonde notamment le forage, peut provoquer la corrosion des canalisations et ballons d'eau chaude. La consommation excessive de l'eau très riche en fer peut perturber la santé humaine particulièrement les troubles digestifs, la chute de cheveux, ainsi que le gout désagréable. Elle peut déposer des taches sur les vêtements.

I.6.2.11 Le calcium

La dureté calcique est la concentration en ion calcium Ca^{2+} présent dans l'eau. L'eau ayant les valeurs de 50 à 100mg/l de $CaCO_3$ est douce, celle ayant 100à150 est moyennement dure.

Le calcium est un métal alcalino-terreux largement présent dans la nature, notamment dans les roches sous forme de carbonates, qui constituent un composant principal de la dureté de l'eau.

Il est généralement l'élément prédominant dans les eaux destinées à la consommation (Amina, 2010)**.**

I.6.2.12. Magnésium

Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrés calcaires dolomitiques. Tout comme le calcium, la concentration en Mg^{2+} est déterminée pour des raisons esthétiques et non de santé (Naomie, 2019)**.**

I.6.3. Les paramètres microbiologiques

I.6.3.1. Coliformes fécaux

Les coliformes sont remarquables parce qu'une grande quantité d'entre eux prospère dans les excréments des animaux à sang chaud, faisant d'eux des marqueurs fécaux de premier plan (Hadji, 2020). Ils s'utilisent encore comme indicateurs microbiens, mais les publications montrent depuis longtemps un manque de spécificité de la numération des coliformes quant à l'origine fécale d'une pollution de l'eau potable (Verhille, 2013).

I.6.3.2. Coliformes totaux

Les coliformes totaux sont sensibles au chlore, leur présence dans les échantillons d'eau peut indiquer l'existence d'un biofilm ou un manque d'efficacité du traitement. La présence de CT peut indiquer une détérioration de la qualité de l'eau, due au système de distribution (Verhille, 2013).

I.6.3.3. Escherichia coli

L'espèce E. coli est un résident permanent de l'intestin humain et animal, y établissant sa colonie dès les premières heures suivant la naissance. Dans ce contexte, cette espèce est reconnue comme l'indicateur le plus précis de contamination fécale lorsqu'elle est détectée dans l'eau ou la nourriture (Amina, 2010).

La contamination récente par des matières fécales humaines ou animales représente la principale source de pathogènes dans l'eau potable comme fosses septiques et rejets d'eau usées mal traités ; lessivage de fumiers animaux ; eaux de ruissellement ; animaux domestiques ou sauvages. Les bactéries notamment la présence d'E. coli coliformes totaux, virus et parasites pathogènes souvent présents dans les matières fécales peuvent provoquer des maladies, dont certaines présentent des symptômes grippaux tels que nausées, vomissements, fièvre et diarrhée (Madison, 2017).

I.6.3.4. Salmonella

Bacilles incurvés à Gram négatif ; Réservoir exclusivement humain, eaux polluées et son mode de transmission se fait par ingestion d'eau souillée par des excréments infectés (Tazi, 2025)**.** La transmission de Salmonella Typhi et Paratyphi se fait par voie fécale-orale, d'un individu à un autre, par l'ingestion d'eau ou de nourriture contaminée par les excréments d'une personne infectée (Saisine, 2021).

I.6.3.5. Vibrio cholerae

Vibrio du cholerae est un agent causal du choléra, maladie diarrhéique aiguë, qui peut être mortelle en quelques heures sans intervention médicale. Il est déclenché par la consommation d'aliments ou d'eau contaminés par le bacille *Vibrio cholerae* (Sacheli, 2017).

I.7. Normes microbiologiques de la qualité de l'eau

Les directives de la qualité de l'eau potable sont très rigoureuses. Elles s'appuient, en général, sur les travaux médicaux établissant les doses maximales admissibles (DMA). Sur cette base, on calcule la quantité maximale de chacun des composants, laquelle peut être apportée par l'eau, en prenant une confortable marge de sécurité. C'est le principe de précaution. Ainsi, le tableau ci-dessous consigne les directives microbiologiques de l'eau établies par l'EAC et l'OMS.

Tableau 2: Normes de la qualité physico chimiques de l'(OMS, 2017)

Paramètres	Unité	Valeurs guides de l'OMS
Calcium (Ca^{2+})	mg /l	100
Nitrates (NO_3^{2-})	mg/l	50
Manganèse Mn^{2+})	mg/l	0,05
Salinité	g/l	0,2g/l
Fer (Fe^{2+})	Mg/l	0,3
Température	T° C	25 à 30
Ph	-	6,5< pH>8,5
Turbidité	UTN	1,0
Conductivité	µS/cm	500 à 1500

Tableau 3: Les normes de la qualité physico chimique de l'eau de l'(EAC, 2022)

Paramètre	Les limites de l'eau potable	Méthode d'analyse
Ph	5,5-9,5	ISO 10523
TDS	1500mg/l	ASTM D 5907
Turbidité	25 UTN	ISO 7027
Calcium	150mg/l	ISO 7980
Fer total	0,3 mg/l	ISO 6332
Nitrates	45mg/l	ISO 7890
Nitrites	0,9mg/l	ISO 6777
Manganèse	0,1mg/l	ISO 6333
Conductivité	2500	ISO 7888
Salinité	0,2g/l	

Tableau 4: Normes des paramètres Microbiologiques

Paramètres	Unité	Directives de l'(EAC, 2022)	Directives de l'(OMS, 2017)
Coliformes totaux	UFC/100ml	0	0
Coliformes fécaux	UFC/100ml	0	0
Escherichia coli	UFC/100ml	0	0
Shigella	UFC/100ml	0	0
Salmonella	UFC/100ml	0	0
Vibrio cholerae	UFC/100ml	0	0

I.8. Pollution de l'eau

I.8.1. Définition d'une eau polluée

La pollution de l'eau se défini comme étant toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse à l'utilisation. Cette pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines ainsi qu'aux phénomènes naturels (Kouassi, 2021). L'eau peut contenir des effets multiples qui touchent aussi bien la santé publique que les organismes aquatiques, ainsi que la flore et la faune terrestre. Les maladies hydriques sont n'importe quelles maladies causées par la consommation d'eau contaminée par des fèces animales ou humaines, qui contiennent des micro-organismes pathogènes (Madison, 2017).

I.8.2. Pollution des eaux souterraines

I.8.2.1. La contamination chimique

Les eaux souterraines, généralement à l'abri de la contamination, sont localisées sous le sol et leurs caractéristiques peuvent éventuellement évoluer au fil du temps (Messikh, 2020). Les caractéristiques physico-chimiques sont modifiées, entre autres, par la composition chimique et minéralogique des sols traversés (Essouli, 2024). Bien que les eaux de forages bénéficient d'une protection naturelle grâce à leur profondeur et aux propriétés géologiques des sols environnants, elles demeurent vulnérables à la contamination, qu'elle provienne des secteurs industriel, agricole ou domestique (Ilias, 2024).

L'eau peut contenir une grande diversité de substances chimiques d'origine naturelle (fluor, calcium, etc.) ou non (résidus médicamenteux, métaux lourds, pesticides, etc.). Certaines d'entre elles sont potentiellement dangereuses pour la santé de l'homme et pour les milieux aquatiques. Elle se manifeste par des maladies et des pathologies sur le long terme notamment saturnisme, cancer, perturbations de la reproduction (Anne, 2020).

I.8.2.2. La contamination microbiologique

Le rejet d'eaux usées domestiques non traitées, les débordements des réseaux d'égouts par temps de pluie, de même que l'épandage de fumier et de lisier sont les sources principales de contamination bactériologique (Serges, 2000). La présence de bactéries dans l'eau peut la rendre non appropriée pour certaines activités.

De plus, l'installation de la pompe, du système de refoulement ou tout autre composant du système de pompage ou pressurisé peut également être une source de contamination si ces éléments ne sont pas correctement assemblés et installés dans des conditions d'hygiène avant leur fonctionnement (Madison, 2017).

Ces contaminations peuvent se traduire par des maladies bactériennes les plus couramment rencontrées comprennent entre autres des diarrhées ou des gastro entérites, potentiellement dangereuses pour les individus fragilisés à savoir les personnes âgées, nourrissons (Anne, 2020).

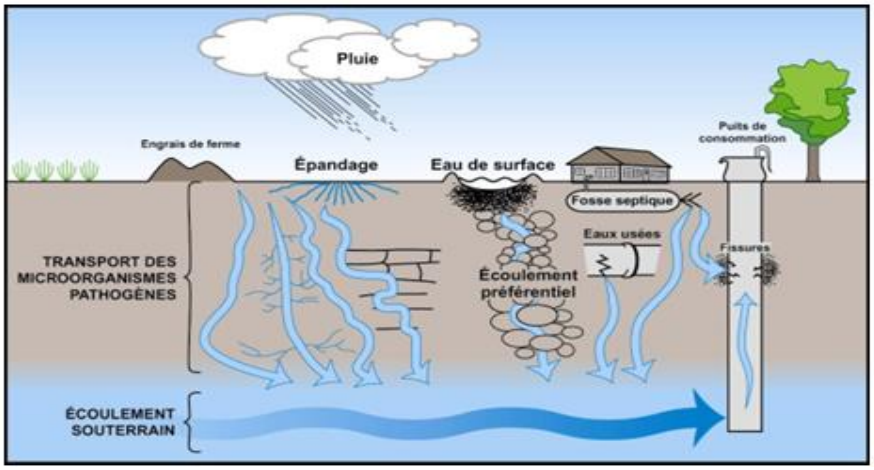


Figure 3: Présentation schématique du cycle des microorganismes pathogènes dans le système sol -eau souterraine(Majdoub et al., 2003).

.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

II.1. Présentation des zones d'étude

L'analyse de l'eau a été effectuée en date du 3/10/2025 ; du 9/12/2025 et du 26/01/2026. Elle a visé à évaluer la qualité des eaux de forage dans la Commune Ntahangwa, qui se situe dans la Zone Kamenge (quartier Mirango et Mukozi), la zone Ngagara (Quartier Mubano et Muhizi) ainsi que dans la commune de Mpanda Zone Gihanga (village 2, 5, 6 et 7) dans la province de Bujumbura au Burundi. L'analyse microbiologique et physicochimique a été réalisée dans les laboratoires de microbiologie et de biochimie du Centre National de Technologie Alimentaire (CNTA). Elle se concentrait sur l'étude de divers paramètres physico-chimiques et microbiologiques. Ces zones affichent une forte concentration urbaine, une intense activité humaine et une utilisation courante des eaux souterraines pour la fourniture d'eau, ce qui nécessite un suivi strict.

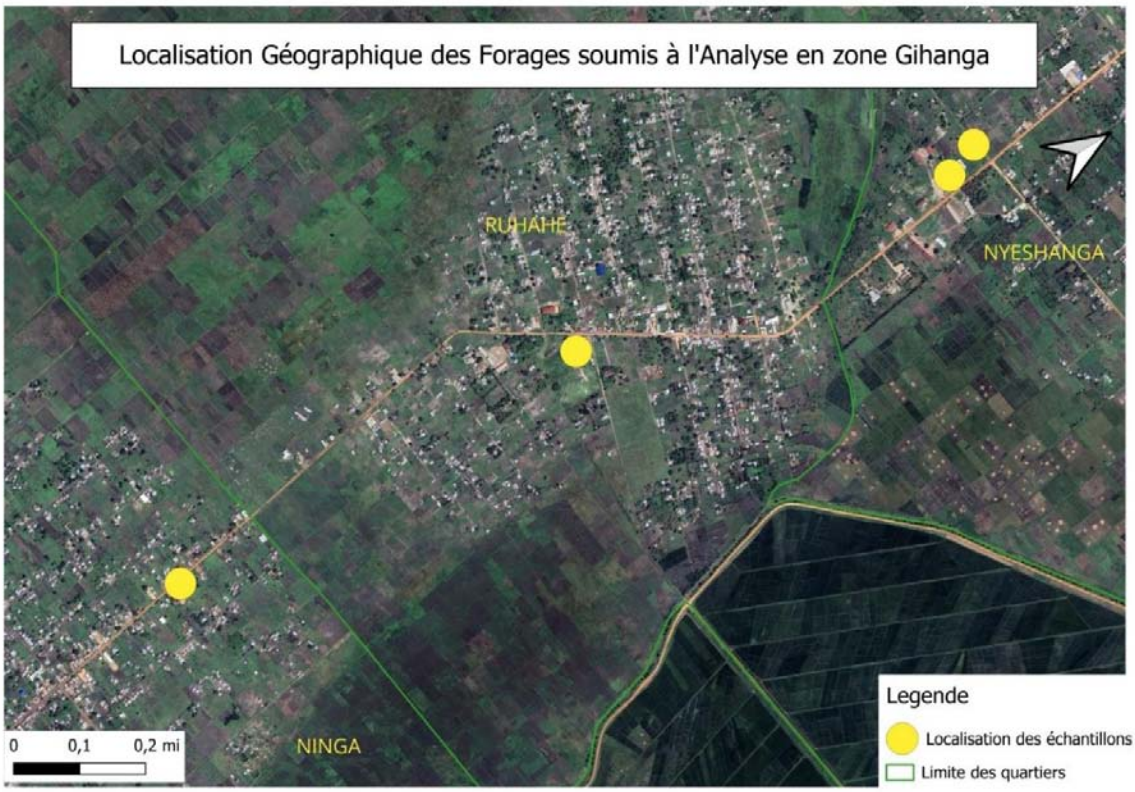


Figure 4: Localisation géographique des forages échantillonnés dans la zone de Gihanga (Mpanda)

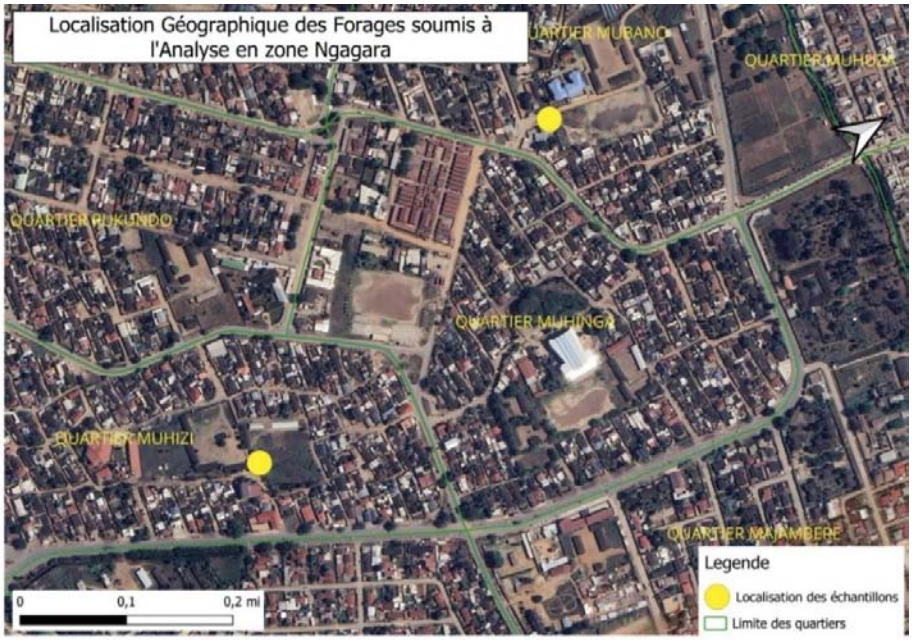


Figure 5: Localisation géographique des forages échantillonnés dans la zone de Ngagara



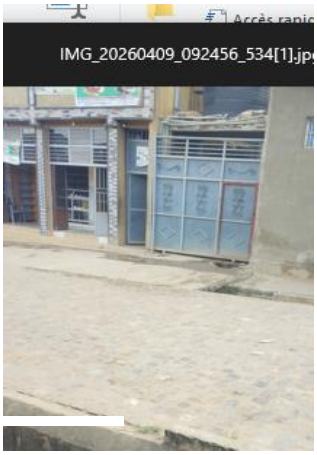
Figure 6: Localisation géographique des forages analysés dans la zone de Kamenge

II.2. Les forages échantillonnés

Il a été échantillonné 10 forages lors de l'analyse.



1.Forage : Nyabagere



2. Forage : Mirango 11ème



3. Forage : Mirango10 ème



4. Forage : Mukozi (Mirango 13ème Avenue)



5.Forage: Mubano (Ngagara)



6.Forage : Muhizi (Ngagara 4)



7.Forage : Village7



8.Forage : Village 5



9. Forage : Village6



10. Forage : Village2

Figure 7 : Les forages soumis à l'analyse

II.3. Matériels et équipements utilisés pendant l'analyse

Bouteilles en verre ; gants stériles ; glacière ; étiquettes résistantes à l'eau, un registre ; GPS ou enregistreur de coordonnées ; téléphone. Les flacons en Verre lavés destinés aux analyses microbiologiques ont été stérilisés à l'autoclave à 121°C pendant 15 minutes conformément aux recommandations de l'OMS (2017).

Le matériel et les équipements utilisés sont :

- Balance analytique : utilisée pour peser les différents milieux de cultures et les échantillons à analyser
- Autoclave : Utiliser pour la stérilisation des milieux de cultures et liquide de dilution. Il est utilisé aussi pour la destruction des boîtes de Pétri ensemencées et déjà dénombrées ;
- Bain-marie : utilisé pour maintenir les milieux de cultures préparés à l'état liquide ;

- Plaque chauffante magnétisée : utilisé lors du chauffage des milieux de cultures et liquide de dilution pour la dissolution complète des particules solides ;
- Etuve : utilisé pour la stérilisation du matériel en verre ou métal ;
- Agitateur vortex : utilisé pour la centrifugation des dilutions lors de l'ensemencement ;
- Frigo : utilisé pour la conservation des milieux de cultures préparés et les échantillons à analyser dégradables rapidement ;
- Incubateur : pour l'incubation des boîtes de Pétri ensemencées ;
- Compteur de colonies ou stylos compteurs : utilisé pour le comptage des colonies ;
- Bombonne à gaz butane et Bec-bunsen : pour la stérilisation du milieu de travail ;
- Boîtes d'allumette : utilisé pour produire la flamme servant à brûler le gaz butane de la bonbonne ;
- Boîtes de pétri : Utilisée pour l'ensemencement des microorganismes pour les milieux solides ;
- Erlenmeyer : bocal en verre graduée utilisé pour la préparation des milieux de cultures lors du chauffage ;
- Marqueur : utiliser pour écrire sur les boîtes de Pétri et les erlenmeyers ;
- Papier aluminium : utilisé pour le bouchage des erlenmeyers pendant la stérilisation des milieux de cultures et la conservation des échantillons ;
- Pipettes et micropipettes : utiliser lors de l'ensemencement pour le prélèvement ;
- Spatules : utilisé pour prélever l'échantillon et les milieux de cultures pendant la pesée ;
- Pissettes : Dans laquelle on met l'eau de javel, eau distillée, alcool pour le nettoyage de la paillasse et la désinfection.





Glacier à 4°c



Flacons en verre



Autoclave





Bouteilles en plastiques

Figure 8 : Matériels d'échantillonnage

II.4. Prélèvement des échantillons d'eau à analyser

Lors de prélèvement de l'échantillon l 'eau a été laissée couler pendant cinq minutes, il a été prélevé soigneusement l'eau provenant du forage dans des bouteilles en plastique propres et en verre rincées trois fois à l'eau distillée pour obtenir des échantillons fiables. Pour les échantillons Physicochimiques, les bouteilles en plastiques ont été remplies afin de prévenir toute modification de l'eau prélevée due à l'oxydation de l'oxygène.

Il a été choisi les forages dans des endroits où la majorité de la population puise souvent de l'eau. Tous les échantillons collectés ont été acheminés au laboratoire de microbiologie et biochimie de Centre National de Technologie Alimentaire (CNTA) pour faire des analyses microbiologiques et physico-chimiques.

Les échantillons ont été collectés dans la province de Bujumbura, plus précisément dans la Commune Ntahangwa (Zone Kamenge, incluant les quartiers Mirango, Mukozi ancien quartier Mirango II) et Zone Ngagara (quartiers Mubano (ancien Ngagara2) et Muhizi (ancien Ngagara4)). Ainsi qu'en Commune Mpanda (Zone Gihanga). L'analyse physico-chimique de l'eau comprend la détermination des paramètres suivants : potentiel d'hydrogène, température, conductivité électrique, turbidité, fer, salinité, totale des solides dissous (TDS), calcium, manganèse, nitrates et nitrites et l'analyse microbiologique a été fixée sur les coliformes totaux, les coliformes fécaux, *Escherichia coli*, salmonella, shigella et *vibrio cholerae*.

II.5. Les étapes de l'analyse microbiologique

II.5.1. Hygiène au laboratoire

Avant de faire toute analyse, on fait la propreté du lieu de travail, du matériel et de nous-mêmes pour éviter tout risque de contamination de l'échantillon, afin de ne pas fausser les résultats de l'analyse. Les matériels utilisés notamment les boîtes de pétri, les pipettes, les erlenmeyers, les tubes à essai et tout autre instrument à utiliser ont été lavé convenablement et stérilisés dans une étuve ventilée entre 170°C et 180°C pendant 2 heures.

Les équipements ont été aussi nettoyés convenablement. Il s'agit spécifiquement d'analyser les paramètres bactériologiques, notamment de rechercher les coliformes totaux, les coliformes fécaux (thermo tolérants), les salmonella et shigella, les *Escherichia coli* et les *vibrio cholerae.* Ainsi, ces bactéries ont été identifiées et dénombrés par la méthode de filtration sur membrane qui consiste à faire passer 100 ml d'eaux de puits sur une membrane dont le diamètre des pores est de 0,45 µm.

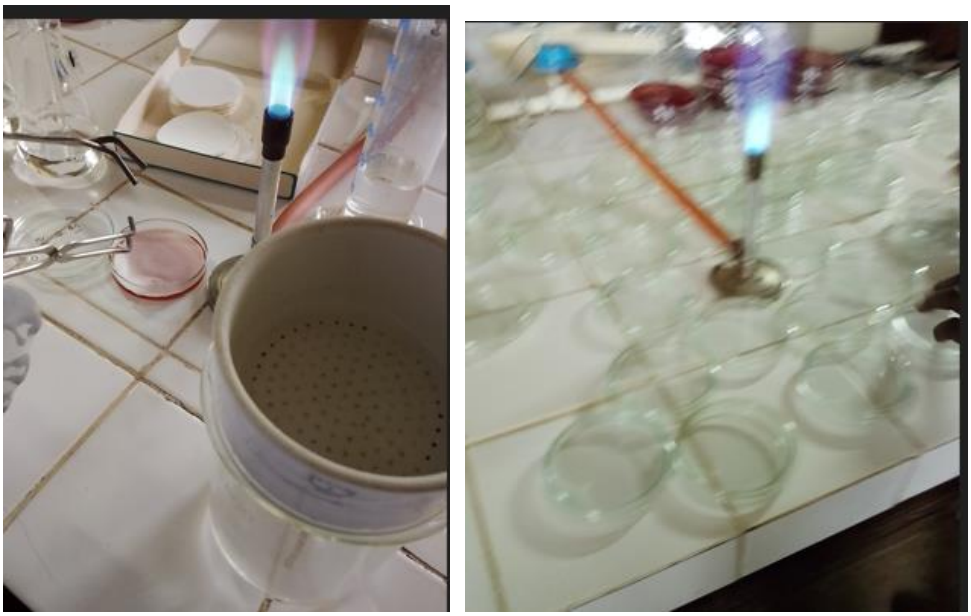
. 

Figure 9: Dispositif pour la désinfection du milieu d'analyse

II.5.2. Préparation des milieux de culture

Pour chaque milieu de culture, nous avons pesé à la balance des quantités en grammes correspondant à 500 ml d'eau distillée. Puis nous avons chauffé et homogénéiser à la plaque chauffante jusqu' à l'ébullition.

Les milieux de culture que nous avons utilisée, n'ont pas besoin d'être stérilisé selon leur nature ; ils sont ensuite placés dans le bain-marie entre 47° - 50°C pour éviter la solidification avant leurs utilisations. Ces milieux sont Violet Red Bile Agar (VRBA), Salmonella Shigella Agar (SSA) ; TCBS Agar. Les membranes ont ensuite été placées sur des milieux sélectifs pendant 24 heures à 37 ° dans l'incubateur et à 44°C dans le bain marie (Karambiri, 2023). Les milieux de culture suivants VRBA (Violet Red Bile Agar) 37°c, VRBA (Violet Red Bile Agar) 44°C, SSA (Salmonella Shigella Agar) et TCBS (Thiosulfate citrate bile saccharose) ont été utilisés.

Il a été pesé 41 ,53 g de SSA et a été ajoute dans 1000ml d'eau distillée lors de l'analyse des salmonella et shigella ; 31.51g de TCBS a été mis dans un erlenmeyer contenant 500ml d'eau distillée pendant l'analyse des vibrions du cholerae.44, 54g de VRBA a été ajoutés dans 500ml d'eau distillée pour au moment de l'analyse de coliformes fécaux et Escherichia coli.



Figure 10 : Milieux de culture préparés (De gauche à droite : SSA, VRBA, TCBS)

Après avoir mélangé avec du téflon, le milieu de culture a été placé sur la plaque chauffante afin de faciliter l'homogénéisation.

Tableau 5: Germes, milieux de culture spécifiques, temps d'incubation et différentes colorations

Microorganismes recherchés	Milieu de culture	Température d'incubation	Durée d'incubation	Identification des germes
Coliformes totaux	VRBA	37°C	24 heures	Colonies rouges
Coliformes fécaux	VRBA	37°C	24heures	Colonies rouges foncées
Escherichia coli	VRBA	44°C	24/48 heures	Colonies rouges
Salmonella et Shigella	SSA	37°C	24 heures	Colonies roses
Vibrion du cholerae	TCBC	37°C	24heures/48heures	Colonies jaunes

II.5.3. Filtration de l'échantillon

Etant donné que le papier filtre utilisé était circulaire, on était obligé de le couper en 3 morceaux tout en mesurant l'épaisseur des boites de pétri destiné à ensemencer l'échantillon, puis ; on a prélevé 100 ml de l'échantillon et on verse doucement une petite quantité sur un papier filtre mieux placer sur un entonnoir.



Figure 11 : Papier filtre et entonnoir pour la filtration

II.5.4. Ensemencement

Au cas où on remarque que la filtration a été Complète, on retire le papier filtre sur l'entonnoir a l'aide d'un étaleur et on étale sur la boite de pétri contenant une certaine quantité de milieu de culture de façon renversée. On a fait le couple 2 à pour chaque cas, sauf VRBA 37°et 44° ou on a 4 boites de pétri (2 pour 37° et 2 pour 44°).

Pour les échantillons nécessitant les VRBA 44°, on les place dans le Bain Marie et ils y passent 24h Pendant la préparation des milieux de culture, nous avons pesé une quantité de milieux suffisante pour chaque type d'analyse et nous l'avons mise dans un erlenmeyer et mélangé avec de l'eau distillée selon les indications figurant sur l'emballage. Puis, nous avons chauffé le mélange sur une plaque chauffante magnétisée en agitant jusqu'à l'ébullition. Ces milieux de culture utilisés comme TCBSA, SSA, VRBA, ne sont pas auto clavés ; en attendant leur utilisation, nous les avons mis directement dans un bain-marie à 50°C pour les maintenir en surfusion avant leur utilisation.

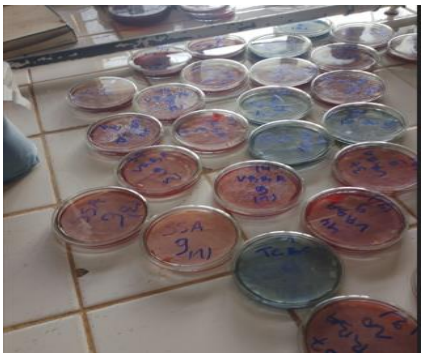


Figure 12 : Boites de pétri ensemencées

II.5.5. Incubation

Après la solidification des milieux de cultures dans les boîtes de Pétri, nous procédons à leur incubation de façon retournée pour éviter la condensation de l'eau qui peu fausser lors du dénombrement au cas où les gouttes retombent dans la boite de Pétri. Pour les échantillons nécessitant les VRBA 37°SSA et TCBS, on ensemence dans un incubateur à 37° et ils y passent 24heures selon les normes de l'OMS. Après solidification des milieux dans les boîtes ensemencées, nous avons procédé à leur incubation de façon retournée pour éviter la condensation qui peut fausser les résultats lors du dénombrement au cas où les gouttes retombent dans la boîte de pétri.



Figure 13 : Incubateur contenant les boites de pétri ensemencés

Le Bain Marie

Pendant l'analyse de l'Escherichia coli on a utilisé VRBA 44°, il a été placé l'échantillon dans le bain Marie pour y passer 24h.



Figure 14 : Bain Marie

II.5.6. Dénombrement, lecture et calcul des résultats

Le dénombrement se fait sur les boîtes de Pétri d'une même dilution et dont les colonies sont bien visibles et séparées et puis on fait la moyenne des résultats trouvés sur les deux boîtes dénombrées et multiplié par l'inverse de la dilution considérée. Le dénombrement a été effectué par un comptage simple de colonies bactériennes qui ont poussé, en observant différentes couleurs visibles à l'œil nu sur les boites de pétri (Essouli, 2024). On a identifié les milieux de culture en tenant compte des microorganismes correspondant.

Le dénombrement des germes s'effectue sur les deux boîtes de pétri d'u même milieux de culture ainsi que l'échantillon correspondant et dont les colonies sont bien visibles et séparées. On fait la moyenne des résultats trouvés sur les deux boîtes dénombrées.



Figure 15 : Dénombrement avec compteur de colonies

II.6. Analyse physico-chimique

Les analyses physicochimiques de l'eau permettent d'évaluer sa qualité, sa potabilité et son aptitude à différents usages. Elles consistent à mesurer des paramètres physiques (pH, TDS température, turbidité, conductivité) et chimiques (concentrations en fer, salinité, calcium, manganèse, nitrates, nitrites,).

II.6.1. Détermination du pH et TDS

Le pH est une mesure de l'activité de l'ion d'hydrogène dans une solution. Le pH est défini comme l'inverse du logarithme de l'activité de l'ion d'hydrogène comme suit : $pH = -_{loga10}\ H+$. Le pH est mesuré à l'aide d'une électrode de verre, dont le potentiel varie linéairement, à température constante, en fonction de la concentration des ions d'hydrogène selon l'équation de Nernst.

Matériel et appareil

Électrode de pH de marque HANNA mesurant TDS et pH ; Tubes de plastique de 50 ml ; Solutions tampons de calibration (à pH 4, pH 7, pH 10).

Mode opératoire :

- ✓ Allumer le multi paramètre et le mettre à zéro ;
- ✓ Rincer l'électrode de l'appareil avec l'échantillon d'eau à analyser ;
- ✓ Plonger l'électrode dans le flacon contenant l'échantillon d'eau ;
- ✓ Lire et noter les résultats affichés à l'écran. Les résultats sont exprimés en unités de pH. La courbe est linéaire pour des valeurs comprises entre 1 et 14 unités de pH.



Figure 16 : Multi paramètres



Figure 2 : pH-mètre

II.6.2. Conductivité/Température/Salinité

La conductivité d'une solution est la mesure de la capacité des ions à transporter un courant électrique. Ce passage du courant électrique s'effectue par la migration des ions dans un champ électrique produit par un courant alternatif.

❖ Matériel et appareil :

Cellule de conductivité de marque Metrohm, constance de cellule de 0,8 cm-1 ; Tubes de plastique de 50 ml ; Analyseur multi paramètres de marque Consort, modèle C3210 ; Solutions étalons certifiées pour la conductivité d'environ 140 µS/cm et 1400 µS/cm.

❖ Mode opératoire :

- Rincer l'électrode de l'appareil avec l'échantillon d'eau à analyser ;
- Plonger l'électrode dans le flacon contenant l'échantillon d'eau pendant une minute ;
- Lire et noter les résultats affichés à l'écran

Les résultats sont exprimés en µS/cm et sont calculés par le logiciel après l'étalonnage de l'électrode

II.6.3. La Température

Au cours de la prise de température de l'eau, on a employé un thermomètre à mercure qui est gradué au dixième. Il faut le garder dans l'eau pendant 10 minutes. On considère que la mesure est complète lorsque deux relevés à 15 secondes d'intervalle affichent le même chiffre. Si la mesure directe n'est pas réalisable, il faut recueillir l'échantillon d'eau dans un contenant d'un minimum de 1 litre qui doit avoir atteint la température de l'eau. Elle est mesurée directement sur site avec un thermomètre ou une sonde multi paramètre.

II.6.4. La turbidité

La turbidité est une caractéristique physique de l'eau et elle est causée par la présence de matières en suspension ou des impuretés qui nuisent à la clarté de l'eau. Elle est déterminée à l'aide d'une néphélométrie.

❖ Matériel, appareillage, Réactifs et étalons

Titrateur robotisé de marque HANNA ; turbidimètre de marque HANNA, modèle HI88703 avec cellule de travail intégrée ; tubes ; ensemble d'étalons de turbidité de la compagnie HANNA pour l'étalonnage (Stablcal 20 UTN et 600 UTN), pour la vérification (Stablcal 10 UTN) et pour l'extrapolation (4000 UTN pour dilution).

❖ Procédure :

- Allumer le turbidimètre et le mettre à zéro ;
- Agiter l'échantillon avant de commencer à l'utiliser ;
- Rincer correctement (3 fois) la cellule (tube à test) avec l'échantillon à analyser ;
- Remplir le tube jusqu'au trait de jauge avec l'eau à analyser ;
- Fermer le tube, le sécher avec de l'essuie –tout ;
- Insérer le tube dans l'appareil en alignant les symboles des flèches sur le flacon et sur l'appareil ;
- Lire et noter le résultat sur l'écran de l'appareil de mesure. Les résultats sont exprimés en unités de mesure néphélométrique (UTN).



Figure 18: Turbidimètre de type 2100N-HACK

II.6.5. Détermination des nitrates et nitrites

Les ions NO_3^- et NO_2^- sont déterminés par un spectrophotomètre du type S2.

La concentration en nitrates a été déterminée par spectrophotométrie (Adebayo ,2021). Une quantité de (25 ml) a été prélevée et introduit dans un bécher de 50 ml, puis un sachet de réactif NitraVer 5 a été ajouté. Le mélange a été agité et laissé pendant une période de 5 minutes.

Une coloration ambre se développe en présence de nitrate, après le zéro, la lecture a été faite et le résultat s'exprime en mg/l. Le programme mémorisé pour les nitrates est 355 ; la longueur d'onde Niakate.et al (2023).

Mesurage spectrométrique du composé jaune issu de la réaction des nitrates avec l'acide sulfosalicylique (formé par addition à l'échantillon de salicylate de sodium et d'acide sulfurique) après traitement à l'alcali.

En même temps que l'alcali, on ajoute du sel disodique de l'acide éthylènediamine-tétraacétique (Na*EDTA) pour empêcher la précipitation des sels de calcium et de magnésium. L'adjonction d'azoture de sodium vise enfin à neutraliser I 'interférence des nitrites (Berne, 2010).



Figure 19: Le Kit du réactif spécifique aux ions nitrites (LCK 541)

II.6.6. Dosage spectrophotométrique du Fe^{2+}

Le dosage spectrophotométrique du fe^{2+} a été réalisé par l'ortho- phénanthroline

❖ Principe :

Le Fe^{2+} réagit avec l'Ortho-phénanthroline pour former un complexe rouge orangé. L'intensité de la coloration est fonction de la concentration des ions Fe^{2+}.

Elle est indépendante de l'acidité dans la gamme de pH allant de 2 à 9. La présence éventuelle des ions Fe^{3+} est évitée par sa réduction par le chlorure d'hydroxylammonium. Elle permet de mesurer l'absorption de la lumière à une longueur d'onde spécifique par les atomes de fer à l'état fondamental présent dans l'échantillon à la longueur d'onde de 248,3 nm.

Le dosage du fer total ou de ses formes ioniques Fe^{2+} et Fe^{3+} dans l'eau par SAA (Spectroscopie d'Absorption Atomique) permet de détecter des concentrations à l'état de traces (de l'ordre de 0,002 mg/l).

❖ Matériel et consommables

Spectrophotomètre UV-VIS ; ballons jaugés de 10ml, 25ml et de 100ml ; pissettes ; O-phénanthroline monohydrate à 25% dans l'eau ; acétate de sodium 2M ; Chlorure Discrimination entre Fer total et Ferreux

La SAA mesure le fer total.

❖ Pour doser spécifiquement les ions ferreux Fe^{2+} :

✓ Prélevez deux aliquotes identiques.

✓ Dosez le fer total sur le premier échantillon acidifié.

✓ Dosez le fer uniquement complexé au moyen de réactifs colorimétriques spécifiques (tels que l'orthophénantroline) sur le second échantillon non acidifié ou masqué.

✓ Déduisez la concentration en ions ferreux par différence.

❖ Etablissement de la courbe d'étalonnage

Après avoir tracé la courbe d'étalonnage (densité optique=f(c), (Absorbance en fonction de la concentration) déterminer graphiquement la concentration des ions Fe^{2+} de la solution de concentration inconnue. Tenir compte de la dilution éventuelle.

II.6.7. Dosage spectrophotométrique du ca^{2+}

❖ Principe

Le dosage du calcium par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) permet de déterminer la concentration en Ca^{2+} dans l'eau. La méthode implique une dilution préalable de l'échantillon, l'ajout d'un agent démasquant (chlorure de lanthane) pour éviter les interférences chimiques, puis la mesure par aspiration dans une flamme air/acétylène à une longueur d'onde de 422 nm. Pour éviter l'interférence des phosphates et du magnésium, l'ajout d'un agent dépresseur (comme le lanthane) est indispensable.

❖ Préparation des Réactifs

Solution mère de calcium (1 g/l) : Dissoudre2, 497g/l de carbonate de calcium ($CaCO_3$) dans de l'acide chlorhydrique dilué, puis compléter à 1 L avec de l'eau déminéralisée.

Solution d'ajusteur (Chlorure de Lanthane $LaCl_3$: Préparer une solution à 25 g/L à partir de sel de lanthane et d'acide chlorhydrique concentré. Le lanthane agira comme "agent libérateur" pour empêcher les interférences du phosphore et de l'aluminium.

❖ Gamme d'Étalonnage

Préparer au moins 5 standards

Dans chaque fiole de 100 ml, ajouter un volume fixe de la solution d'ajusteur (souvent 10 ml de $LaCl_3$ pour garantir la même matrice que vos échantillons.

Compléter avec de l'eau déminéralisée.

❖ Protocole Opératoire

Dilution : Si la concentration en calcium est élevée (comme dans les eaux minérales ou l'eau de mer), diluer l'échantillon d'eau de manière à ce que l'absorbance tombe dans la gamme linéaire d'étalonnage.

Ajout de l'agent interférent : Prélever le volume de l'échantillon d'eau dilué dans une fiole jaugée. Ajouter la même proportion de solution de lanthane que pour les standards.

Mesure SAA : Régler le spectromètre à la longueur d'onde de 422,7nm. Utiliser une flamme air/acétylène. Aspirer l'eau déminéralisée pour le zéro, puis mesurer l'absorbance des étalons et des échantillons.

❖ Expression des Résultats

Tracer la courbe d'étalonnage : Absorbance} = f/Concentration.

Déduire la concentration de l'échantillon inconnu en tenant compte du facteur de dilution appliqué.

II.6.8. Dosage spectrophotométrique du Mn^{2+}

❖ Principe

Le dosage du manganèse (Mn) dans l'eau par Spectrométrie d'Absorption Atomique (SAA) se fait généralement par SAA à la flamme (air-acétylène) pour des concentrations de l'ordre du mg/l, ou par SAA avec atomisation électrothermique (four graphite) pour les traces (µg/l).

La méthode se structure en 4 étapes clés :

❖ Préparation de l'échantillon

Filtration et acidification : L'échantillon est filtré sur membrane (0,45 µm) pour séparer le manganèse dissous du manganèse particulaire.

Minéralisation : Pour le manganèse total, une minéralisation acide (ajout d'acide nitrique HNO_3) est indispensable pour dissoudre les particules et libérer le métal complexé. Le pH doit être ajusté entre 1 et 2.

❖ Gamme d'étalonnage

Préparer une série de solutions étalons à partir d'une solution mère commerciale (ex : 1000 mg/l).

Les concentrations couvrent généralement l'intervalle de linéarité de l'appareil utilisé (par exemple de 0,1 5 mg/l) en flamme).

❖ Analyse instrumentale

Longueur d'onde : Régler le spectromètre sur la raie de résonance spécifique du manganèse, soit 279,5 nm.

Type de flamme : Utiliser une flamme oxydante (riche en air) de type air-acétylène.

Absorbance : Aspirer l'essai à blanc, les étalons, puis les échantillons. L'absorption mesurée est proportionnelle à la concentration en manganèse.

❖ Expression des résultats

L'appareil trace une courbe d'étalonnage (Absorbance en fonction de la concentration). Le résultat de l'échantillon est déduit directement de cette courbe, en tenant compte des dilutions éventuelles.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Etant donné que la qualité de l'eau de forage peut être affectée par des activités humaines, en plus des propriétés du sol influencé par la roche-mère, les résultats des paramètres physicochimiques et microbiologiques examinés ont été présentés en fonction des zones exploitées.
En effet, l'eau de forage des zones urbaines est confrontée à des résidus domestiques et industriels, tandis que celle provenant des zones rurales est influencée par les activités agricoles et les déchets ménagers. Des éléments tels que les eaux usées et les latrines peuvent compromettre sa qualité en provoquant une contamination microbienne.

III.1. Analyse des paramètres physicochimiques

III.1.1. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la Zone Kamenge

Spécifiquement, il ressort selon les résultats du tableau 6 que dans la zone de Kamenge, les forages de Mirango Nyabagere et Mukozi 13ème avenue ont des pH significativement égaux ($p>0,05$) avec 7,13±0,03 et 7,09 ±0,01 respectivement. Les forages de Mirango 11ème avenue et Mirango 10ème avenue sont significativement différents ($p<0,05$) avec 7,52 ±0,02 et 7,56±0,01 respectivement. Il a été signalé que ceux forages différent significativement de ceux de Nyabagere. Les forages de Mirango11ème Avenue et Mukozi ont des valeurs de la conductivité significativement différentes ($p <0,05$) avec 833±18, 634±5 respectivement. Les forages de Nyabagere et Mirango 10ème avenue n'ont pas de différence significative. Les résultats de la température montrent une différence significative ($p<0,05$).

Les valeurs des TDS prouvent qu'il y a une différence significative ($p<0,05$). Il a été noté que les résultats de la salinité de la zone Kamenge montrent une différence significative ($p<0,05$). Les forages de Mukozi 13ème avenue et de Mirango 11ème avenue ne respectent pas les normes exigées avec 0,4±0,005 et 0,4±0,002 respectivement.

Tableau 6 : Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Kamenge

Sites	pH	Conductivité (µS/cm)	T° (°c)	TDS (ppm)	Salinité (g/l)
Mukozi	7,09±0,01[c]	634±5[b]	26,7±0,05[a]	420±5[a]	0,4±0,005[a]
Mirango 11ème Av	7,52±0,02[b]	833±18[a]	26,68±4,4E-15[a]	416,7±10,41[a]	0,4±0,002[a]
Mirango Nyabagere	7,13±0,03[c]	627,5±22,5[c]	26,49±0,13[b]	313,2±14,68[b]	0,25±0,05[b]
Mirango10 avenue	7,56±0,01[a]	611±9[c]	26,3±0a[b]	305,5±4,5[b]	0,28±0,09[b]
Moyenne	7,33±0,25	676,38±104,86	26,63±0,1	363,83±63,02	0,34±0,08
Normes EAC	5,5< pH>9,5	2500	25 à 30	1500mg/l	0,2g/l
Normes OMS	6,5< pH>8,5	500 à 1500	25 à 30	1500mg/l	0,2g/l

III.1.2. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la zone Ngagara

Les valeurs du pH des forages de la zone Ngagara respectent les limites exigées selon l'OMS (2017) et l'EAC (2022). La teneur de la conductivité se trouve dans la fourchette normale (Tableau 7). Les forages de Mubano et Muhizi ont des températures acceptables. Les TDS de Muhizi sont hors normes avec la valeur de 190,5±1,5. Le forage de Mubano a une concentration de la salinité moyenne de 0,65±0,15 mg /l qui est en dehors des normes. Ces forages de Ngagara diffèrent significativement pour tous ces paramètres ($p<0,05$) (tableau7).

Tableau 7: Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Ngagara

Sites	pH	Conductivité (µS/cm)	T° (°c)	TDS (ppm)	Salinité (g/l)
Mubano	7,43±0,15[a]	582,5±13,5[a]	27±0[a]	544,8±221[a]	0,65±0,15[a]
Muhizi	7,17±0,13[b]	371,5±13,5[b]	26,66±0,09[b]	190,5±1,5[b]	0,13±0,13[b]
Moyenne	7,3±0,18	477±149,19	26,83±0,24	367,66±250,55	0,39±0,36
Normes EAC	5,5< pH>9,5	2500	25 à 30	1500 ppm	0,2g/l
Normes OMS	6,5< pH>8,5	500 à 1500	25 à 30	1500 ppm	0,2g/l

III.1.3. Détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité dans la Zone Gihanga

Les forages de Gihanga village 5 affichent des valeurs significativement différents ($p<0,05$), il ne respecte pas les standards de l'EAC (2022) avec ses valeurs moyennes de 8,9±0,34 de pH (Tableau 8). Les teneurs de la conductivité des forages de Gihanga échantillonnés diffèrent significativement ($p<0,05$). Les températures moyennes n'ont pas de différence significative ($p>0,05$). Les concentrations de la turbidité ont une différence significative ($p<0,05$). Les concentrations de la salinité n'ont pas de différence significative ($p>0,05$). Par ailleurs, il a été enregistré que tous ces forages ne sont pas conformes aux standards de l'OMS (2017).

Tableau 8: Résultats de la détermination de pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité de la zone Gihanga

Sites	Ph	Conductivité (µS/cm)	T° (°c)	TDS (ppm)	Salinité (g/l)
Village2	7,01±1,088E-15^{c}	560,5±31,5^{b}	26,28±0,5^{a}	444±9^{ab}	0,36±0,05^{a}
Village5	8,9±0,34^{a}	366±9^{c}	26,65±1^{a}	302±50^{c}	0,33±0,05^{a}
Village6	7,34±0^{b}	727,5±13,5^{a}	25,08±0,5^{a}	460,5±4,5^{c}	0,35±0,04^{a}
Village7	7,22±0,29^{bc}	559±48,49^{b}	26,83±1,5^{a}	337,2±103,7^{bc}	0,37±0,12^{a}
Moyenne	7,62±0,86	553,25±147,77	26,21±0,78	385,9±78,21	0,35±0,01
Normes EAC	5,5< pH>9,5	2500	25 à 30	1500 ppm	0,2g/l
Normes OMS	6,5< pH>8,5	500 à 1500	25 à 30	1500 ppm	0,2g/l

III.1.4. Les résultats du test ANOVA pour la comparaison du pH, conductivité, température, TDS, salinité, turbidité Gihanga entre les zones Kamenge, Ngagara et Gihanga

Dans le cadre général, les analyses du pH présentées (dans le tableau 9) indiquent que l'eau de forage extraite de tous les sites est généralement potable, avec un pH moyen de 7,43± 0,54. variation de 7,01 à 8,22. Les valeurs les plus basses et les plus élevées ont été consignées à Gihanga Village 2 et Village 5 durant les mois d'échantillonnage d'octobre, novembre 2025 et janvier 2026, respectivement.

Ces résultats se situent dans l'intervalle des normes de potabilité de l'eau établies par l'EAC (2022), qui fixe les valeurs entre 5,5-9,5 selon ISO 10523, et par l' OMS (2017), qui requiert un pH supérieur à 6,5 et inférieur à 8,5.Ces résultats surpassent ceux de Niyomwungere (2024) qui a réalisé son étude sur les paramètres physicochimiques des forages à Mutimbuzi, une ancienne province de Bujumbura, et a déterminé que le pH moyen était de 6,9±0,43 avec des valeurs variant entre 6,3 et 7,6. De même pour Kouassi (2021) qui a observé une variation du pH entre 6,4 et 8. Ils se rapprochent également des données d'Adebayo et al (2021) du Nigeria qui a relevé des valeurs de pH indiquant l'acidité et l'alcalinité des eaux souterraines comprises entre 7,0 et 7,9 avec un pH moyen de 7,41.Il se pourrait que ce soit l'influence des profondeurs. Les variations du pH observées dans toutes les régions ne présentent pas de différence notable (p value>0,05), avec une séquence de 7,62±0,86 > 7,33±0,25> 7,3±0,18. Les habitants de cette zone peuvent facilement consommer cette eau provenant de la zone mentionnée, car elle répond aux normes.

Ce travail a noté que la conductivité variait de357 à 851µS/cm, avec une valeur moyenne de 587,25±138,2 comme indiqué dans le tableau 9. La mesure de conductivité la plus basse et la plus élevée a été enregistrée au Village Gihanga 5 et à l'avenue Mirango 11, avec respectivement 357 µS/cm et 851 µS/cm.

Ces observations ont révélé que sur les 10 forages analysés, deux en particulier, à savoir Muhizi de Kamenge avec des valeurs allant de 358 à 385 µS/cm et Gihanga village 5 avec des valeurs de 357 à 375 µS/cm, ne sont pas conformes selon l'OMS (2017) et l'EAC (2022), une eau de qualité acceptable pour la consommation se situe généralement entre 500 et 1500 µS/cm, avec des valeurs atteignant jusqu'à 2500 µS/cm selon la norme ISO 7888. Les deux sites précités précisent que l'eau est très légèrement minéralisée. Cela peut être associé à la présence des facteurs mentionnés précédemment qui ont un impact sur la conductivité.

Les forages de Mirango 11ème avenue, Mirango 10ème avenue, Mirango Nyabagere, Mubano, Village 2, Village 6 et Village 7 sont inclus dans la plage de consommation d'eau pour ce paramètre. Les moyennes comparées montrent une différence statistique, avec un écart significatif dans toutes les zones échantillonnées ($p<0,05$), suivant cet ordre : 477±149,19 < 553,25±147,77 < 676,38±104,86. Ces mesures de conductivité électrique diffèrent de celles de Niyomwungere (2024).

D'après son investigation menée dans la localité de Mutimbuzi, les niveaux de conductivité fluctuaient entre 590 µS/cm et 1226 µS/cm, avec une moyenne globale de 862 ±184 µS/cm pour l'ensemble des puits forés. Ces résultats pourraient être affectés par une insuffisance d'accumulation des éléments dissous, en particulier les métaux lourds et les nitrates.

Les valeurs de température affichées dans le tableau 9 varient de 24,5°C à 28,43°C, avec une moyenne de 26,5±0,72 °C. Au village 6, on a enregistré une température minimale de 24,58°C en novembre 2025, alors qu'au village 7, la température maximale a été relevée en novembre 2025. Cette étude a révélé que, dans l'ensemble, les températures des eaux de forage examinées sont acceptables, à l'exception de celle collectée en novembre au village 6 où la valeur est inférieure à la norme de potabilité fixée à 24,5°C. Effectivement, d'après les critères de l'OMS (2017) l'eau est considérée comme thermiquement « bonne » si sa température varie entre 25 et 30°C.

Les moyennes comparées sont statistiquement identiques, il n'y a donc pas de différence significative ($p>0,05$) dans l'ordre ; 26,83±0,24> 26,63±0,1> 26,21±0,78. Ces chiffres sont dans la même zone de conformité. Les résultats diffèrent légèrement de ceux obtenus par Niyomwungere, (2024) qui, dans le cadre de sa recherche, a observé une variation de température allant de 27,90 °C à 30,7°C avec une moyenne globale de 28,80°C ±0,96 pour l'ensemble des puits échantillonnés. De même Kouassi (2021) en côte d'Ivoire a trouvé un minimum de 26.5°C et un maximum de 30°C.Cette distinction notable serait due aux modifications climatiques. Les résultats tableau 9 de la concentration en solides totaux dissous de son travail variaient de 189 et 800 mg/l avec la moyenne 373,43±118,53 mg/l des solides totaux dissous. Un minimum a été remarqué dans le site de Muhizi 189 mg/l et un maximum a été indiqué dans les forages Mubano 800mg/l Octobre 2025 dans la zone de Ngagara. Ces valeurs n'ont pas de différence significative ($p>0,05$) dans cet ordre385, 9±78,21 > 367,66±250,5536> 3,83±63,02.

Ces résultats ont prouvé que dans certaines périodes, l'eau de quelques forages ne remplissent pas les normes de l'OMS (2017) qui conseillent des valeurs <600 mg/l. C'est notamment le forage de Mubano de la zone Ngagara avec 800 mg/l échantillonné dans le mois d'octobre 2025.Sur base des normes de l'EAC (2022) qui exige les valeurs <1500 ppm ASTM D 5907 ; l'eau de tous ces forages analysés se trouvent dans la limite normale de l'eau de consommation.

Ces résultats sont proches de ceux de Niyomwungere (2024) qui a trouvé la teneur variait de 181 et 618 mg/l avec la teneur moyenne (357 ±135 mg/l) des solides totaux dissous.

Ces résultats pourraient être influencés par la teneur faible des particules en suspension dans l'eau de forage notamment les débris végétaux et animaux, l'excès de minéraux.

Cette recherche a révélé des mesures de salinité allant de 0,08 à 0,8 mg/l, avec une moyenne de 0,35±0,14 mg/l pour l'ensemble des forages (tableau 9). Le niveau le plus bas a été noté à Muhizi avec 0,08 mg/l en janvier 2026, tandis que le niveau le plus élevé a été enregistré à Mubano avec 0,8 mg/l en octobre 2025. En suivant les directives de l'OMS qui préconisent <0,2g/l. Sur les 10 forages présentés pour analyse, Le forage Mukozi, les avenues Mirango 11ème et 10ème, ainsi que Mirango Nyabagere, Muhizi, Village2, Village6, Village5 et Village7 dépassent les seuils recommandés par l' OMS (2017).

Seul un forage à Muhizi respecte les normes admissibles, avec des valeurs variant entre 0,08 et 0,18 mg/l. Le site de Mubano a enregistré la valeur la plus élevée en octobre avec 0,8 mg/l. Les moyennes notées sont statistiquement identiques, sans différence notable (P>0,05), avec un ordre de 0,39±0,36 > 0,35±0,01> 0,34±0,08. Ces résultats pourraient être associés à de fortes concentrations en sels dissous, notamment du chlorure de sodium. La consommation régulière d'eau trop salée peut entraîner divers problèmes de santé, tels qu'une augmentation de la pression artérielle, un risque d'accumulation de pathologies cardiovasculaires et une surcharge pour les reins qui doivent intensifier leur travail pour éliminer l'excès de sodium, sans mentionner la dégradation du goût (OMS, 2017).

Tableau 9: Résultats du test ANOVA pour la comparaison du pH, conductivité électrique, température, TDS, salinité, turbidité entre les zones Kamenge, Ngagara et Gihanga

Sites	pH	Conductivité (µS/cm)	T°	TDS (ppm)	Salinité (g/l)
Kamenge	7,33±0,25[a]	676,38±104,86[b]	26,63±0,1[a]	363,83±63,02[a]	0,34±0,08[a]
Ngagara	7,3±0,18[a]	477±149,19[a]	26,83±0,24[a]	367,66±250,55[a]	0,39±0,3[a]
Gihanga	7,62±0,86[a]	553,25±147,77[b]	26,21±0,78[a]	385,9±78,21[a]	0,35±0,01[a]
Moyenne	7,43± 0,54	587,25±138,2	26,5±0,72	373,43±118,53	0,35±0,14
Normes EAC	5,5< pH>9,5	2500	25 à 30	1500mg/l	0,2g/l
Normes OMS	6,5< pH>8,5	500 à 1500	25 à 30	1500mg/l	0,2g/l

Les résultats du tableau 9 montrent clairement que la turbidité varie entre 0,15 et 0,85 UTN, avec une moyenne de 0,4±0,26.

La valeur la plus basse a été observée à Village 2 avec 0,15 UTN et à Mukozi avec également 0,15 UTN en octobre, novembre et à Mubano avec 0,85 UTN en octobre 2025. Ces résultats indiquent que les eaux examinées ne présentent pas une turbidité excessive.

De plus, la moyenne mesurée est inférieure au seuil de conformité préconisé par l'OMS (2017), qui stipule que la turbidité ne devrait pas dépasser 1 UTN pour une utilisation domestique. Les résultats respectent les normes requises de l'EAC (2022), qui stipulent un minimum de 25 UNT selon l'ISO 7027.Les moyennes des résultats affichés ne sont pas identiques.

Il existe une différence notable (p < dans une étude faite au Nigéria selon laquelle la mesure de la turbidité variait entre 0,01 et 0,05 UTN. Ces conclusions diffèrent de l'étude de Niyomwungere (2024) qui a démontré que la turbidité dans les forages de la commune Mutimbuzi variait entre 1,2 et 12,27 UTN, avec une 0,05) qui se traduit par 0,73±0,08 < 0,41±0,16 < 0,24±0,05. Ces découvertes diffèrent de celles d' Adebayo et al (2021) moyenne globale de 5,17± 3,0 UTN pour tous les puits échantillonnés. Cette variation serait affectée par la profondeur et la saisonnalité. Il est possible que ces résultats soient associés à la présence de contaminants dans une quantité extrêmement réduite de matières en suspension.

III.1.5. Détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites et en turbidité

Au sein de la zone Kamenge (tableau 10), les résultats d'analyse montrent que :

Les concentrations en fer des eaux des forages de tous les forages explorés sont significativement égales (P>0,05) avec des concentrations de 0,06±0,07 mg/l, 0±0 mg/l, 0,02±0,002 mg/l et 0,01±0 ppm respectivement à Mukozi, Mirango 11ème avenue, Nyabagere et Mirango 10ème avenue.

Les teneurs en fer des eaux des forages de Mukozi et Nyabagere sont statistiquement égales (P>0,05) tandis que celles de Mirango 11ème avenue et Mirango 10ème avenue sont différentes ((P<0,05) et celles-ci différent de celles de Mukozi et Nyabagere. Les concentrations étant de 0,01±0 mg/l ; 0,003±0,005 mg/l ; 0,01±0 mg/l et 0,03±0 mg/l respectivement à Mukozi, Nyabagere Mirango 11ème avenue et Mirango 10ème avenue.

Les concentrations en calcium des eaux des forages de tous les forages explorés sont significativement égales (p>0,05) avec des concentrations de71, 66±15 mg/l, 2 77±10 mg /l, 74±10 mg/l et 89,66±5,77 mg/l respectivement à Mukozi, Mirango 11ème avenue, Nyabagere et Mirango 10ème avenue.

Aucune différence significative n'a été observée entre les concentrations en nitrates des eaux des forages explorés (p>0.05), avec des concentrations respectives de 15,87±15,27 mg/l 18,8±1,7 mg/l 18,01±2,02 1mg/l et 3,66±3,78 mg/l à Mukozi, Mirango 11ème avenue, Nyabagere et Mirango 10ème avenue.

Aucune différence significative n'a été observée entre les concentrations en nitrites des eaux des forages explorés (p>0,05), avec des concentrations respectives de 1,18±0,76 mg/l ;1,08±0,1 mg/l ; 1,52±0,62 mg/l et 0,83±0,29 mg/l à Mukozi, Mirango 11ème avenue, Nyabagere et Mirango 10ème avenue.

La turbidité des eaux des forages explorés a été significativement égales (p<0,05), avec des valeurs respectives de 0,2±0,05 UTN, 0,2±0,05 UTN, 0,25±0,05 UTN et 0,3±0,05 UTN à Mukozi, Mirango 11ème avenue, Nyabagere et Mirango 10ème avenue (Tableau 10**).**

Tableau 10 : Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Kamenge

Sites	Turbidité (UTN	Fe^{2+} mg/l	Mn^{2+} mg/l	Ca^{2+} mg/l	NO_3^{2-} mg/l	NO^{2-} mg/l
Mukozi	$0,2\pm0,05^a$	$0,06\pm0,07^a$	$0,01\pm0^b$	$71,66\pm15,2^a$	$15,87\pm15,27^a$	$1,18\pm0,76^a$
Mirango 11ème	$0,2\pm0,05^a$	0 ± 0^a	$0,003\pm0,005^c$	77 ± 10^a	$18,8\pm1,7^a$	$1,08\pm0,1^a$
Nyabagere	$0,25\pm0,05^a$	$0,02\pm0,002^a$	$0,01\pm0^b$	74 ± 10^a	$18,01\pm2,02^a$	$1,52\pm0,62^a$
Mirango10	$0,3\pm0,05^a$	$0,01\pm0^a$	$0,03\pm0^a$	$89,66\pm5,77^a$	$13,66\pm3,78^a$	$0,83\pm0,29^a$
Moyenne	0,24±0,05	0,02±0,03	0,01±0,01	78,08±8,02	16,59±2,31	1,16±0,28
Normes EAC	25 UTN	0,3 mg/l	0,1mg/l	150mg/l	45 mg/l	0,9 mg/l
Normes OMS	1 UTN	0,3 mg/l	0,05mg/l	100mg/l	50 mg/l	3 mg/l

Il ressort des résultats du tableau 11 que les eaux de forages de Mubano et Muhizi de la zone Ngagara ont des teneurs en fer, manganèse, calcium, nitrates et nitrites significativement égales ($p>0,05$). Cependant, les turbidités des eaux des forages de Mubano et Muhizi sont significativement différentes ($p<0,05$) avec 0,8±0,05 mg/l et 0,67±0,02 mg/l respectivement. C'est à Muhizi où la turbidité est élevée.

Tableau 11: **Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Ngagara**

Sites	Turbidité (UTN	Fe^{2+} (mg/l)	Mn^{2+}(mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	NO_3^{2-} (mg/l)	NO^{2-} (mg/l)
Mubano	0,8±0,05a	$0,01\pm0^a$	$0,01\pm0^a$	$79,33\pm20,81^a$	$16,57\pm3,68^a$	$0,92\pm0,1^a$
Muhizi	0,67±0,02b	$0,02\pm0^a$	0 ± 0^a	81 ± 10^a	$14,73\pm3,6^a$	$1,34\pm0,5^a$
Moyenne	0,73±0,08	0,015±0,007	0,005±0,007	80,16±1,17	15,65±1,3	1,13±0,29
Normes EAC	25 UTN	0,3 mg/l	0,1mg/l	150mg/l	45 mg/l	0,9 mg/l
Normes OMS	1 UTN	0,3 mg/l	**0,05**	100mg/l	50 mg/l	3 mg/l

Le tableau12 présente les concentrations moyennes en ions fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites et la turbidité de l'eau dans quatre sites de la zone Gihanga (Villages 2, 5, 6 et 7).

Les valeurs suivies de lettres différentes (a, b, c) indiquent une différence significative entre les sites au seuil de 5 % ($p < 0,05$), tandis que les mêmes lettres signifient qu'il n'y a pas de différence significative ($p>0,05$). Pour le fer (Fe^{2+}), une différence significative est observée entre les sites ($p<0,05$).

Le Village5 présente la concentration la plus élevée (0,02 mg/l), tandis que le Village 6 montre la plus faible valeur (0,005 mg/l). Cependant, toutes les concentrations restent très faibles et indiquent une faible contamination en fer.

Concernant le manganèse (Mn^{2+}), le Village7 possède la teneur la plus élevée (0,016mg/l), significativement différente des Villages 5 et 6 où le manganèse est absent. Les concentrations restent néanmoins très faibles dans l'ensemble des sites. Pour le calcium (Ca^{2+}), le Village5 présente la concentration la plus élevée (95,33g/l), significativement supérieure aux autres villages. Les Villages2 et 7 ont les teneurs les plus faibles. Cela montre une variation de la minéralisation de l'eau selon les sites. Les nitrates (NO_3^-) ne présentent pas de différence significative entre les villages (même lettre "a"). Les concentrations varient de 15,53 à 18,18 mg/l, ce qui indique une homogénéité de la contamination en nitrates dans les différents sites. De même, les nitrites (NO_2^-) ne montrent pas de différence significative entre les villages.

Les valeurs observées restent relativement faibles, avec une concentration maximale au Village6 (1,8mg/l) et minimale au Village7 (0,83mg/l). Pour la turbidité, des différences significatives sont observées entre les sites. Le Village 5 présente la turbidité la plus élevée (0,65 UTN ce qui traduit une eau plus chargée en particules en suspension. Le Village 6 possède la plus faible turbidité (0,3 UTN), indiquant une eau plus claire. De ce qui précède, il est à constater que les paramètres étudiés montrent des variations selon les sites, particulièrement pour Fe^{2+}, Mn^{2+}, Ca^{2+} et la turbidité. Toutefois, les concentrations mesurées demeurent globalement faibles, ce qui suggère une qualité physicochimique relativement acceptable de l'eau dans les villages étudiés.

Tableau 12: Résultats de la détermination de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites de la zone Gihanga

Sites	Turbidité (UTN)	Fe^{2+} (mg/l)	Mn^{2+} (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)
Village2	$0,33\pm0,18^{ab}$	$0,01\pm0^{b}$	$0,01\pm0^{ab}$	$71\pm12,28^{b}$	$18,11\pm1,69^{a}$	$1,78\pm0,57^{a}$
Village5	$0,65\pm0,05^{c}$	$0,02\pm0^{a}$	0 ± 0^{b}	$95,33\pm1,52^{a}$	$18,18\pm1,64^{a}$	$1,45\pm0,57^{a}$
Village6	$0,3\pm0,1^{a}$	$0,005\pm0,005^{c}$	0 ± 0^{b}	$90\pm4,58^{b}$	$15,53\pm1,5^{a}$	$1,8\pm0,59^{a}$
Village7	$0,36\pm0,11^{bc}$	$0,01\pm0^{b}$	$0,016\pm0,011^{a}$	$70,33\pm6,11^{b}$	$18,16\pm2,75^{a}$	$0,83\pm1,01^{a}$
Moyenne	0,41±0,16	0,011±0,006	0,006±0,008	81,66±12,88	17,9±1,3	1,46±0,45
Normes EAC	25 UTN	0,3 mg/l	0,1mg/l	150mg/l	45 mg/l	0,9 mg/l
Normes OMS	1 UTN	0,3 mg/l	0,05	100mg/l	50 mg/l	3 mg/l

Généralement, les valeurs relatives à la concentration en Fer fluctuent de 0 à 0,15 mg/l, avec une moyenne de 0,02±0,02 mg (voir tableau 13).

La mesure la plus basse de 0 mg/l est enregistrée chaque mois sur les sites de Mirango 11ème avenue et Village 6 en octobre, tandis que le forage de Mukozi affiche un pic à 0,15 mg/l en novembre. Ces valeurs indiquent que tous les forages testés respectent les standards de OMS (2017) et de l'EAC (2022) avec une valeur autorisée de 0,3 mg/l ISO 6332 pour ce paramètre. Il n'y a pas de différence notable ($p>0,05$) entre ces valeurs, avec un ordre de 0,02±0,03>0,015±0,007> 0,011±0,006. Ces conclusions diffèrent de celles de Sawadogo (2023) qui a étudié l'évaluation de la qualité des eaux de forage dans la commune d'Ouagadougou, Burkina Faso.

Les niveaux d'ions ferreux dans les divers échantillons analysés étaient uniformes, autour de 0,02 mg/l, à l'exception d' un seul échantillon qui présentait une concentration en fer de 0,01 mg/l. Nos résultats se situent en dessous de ceux de Niyomwungere (2024)), qui a obtenu des valeurs de fer variant entre 0,24 et 0,46 mg/l, avec une moyenne globale de 0,32 ±0,06 mg/l. Ces résultats pourraient être attribués à l'utilisation de canalisations non corrosives dans ces forages.

Les résultats obtenus de cette étude ont fluctué entre 0 et 0,03 mg/l, avec une moyenne de 0,01 ± 0,01 mg/l (tableau 13). La valeur la plus basse est notable sur les lieux suivants : Mirango 11ème avenue (0 mg/l) en octobre et janvier, Muhizi (0 mg/l), Village 5 (0 mg/l) et Village 6 (0 mg/l),

tous les mois d'échantillonnage. La valeur la plus élevée a été relevée dans les forages de Mirango 10ème avenue (0,03 mg/l) chaque mois ainsi qu'au Village 7 (0,03 mg/l) en janvier 2026.

D'après les résultats concernant le manganèse, la majorité des eaux respectaient les normes de l'OMS (2017) recommandant un taux de 0,05 mg/l et celles de l'EAC (2022) fixant une limite de 0,1mg/l selon ISO 6333.

Ces chiffres sont statistiquement identiques, il n'y a pas de différence notable entre les emplacements ($p>0,05$) dans cet ordre : $0,01\pm0,01 > 0,007\pm0,008 > 0,005\pm0,007$ respectivement pour Mirango, Gihanga et Ngagara. Ces performances sont moins bonnes que celles de Kouassi (2021) en Côte d'Ivoire, qui a enregistré 0 mg/l et 6,9 mg/l. Une concentration excessive de manganèse dans l'eau peut causer des troubles majeurs touchant le système nerveux et le développement intellectuel des nourrissons, sans oublier la perte de coordination chez les adultes.

Durant cette recherche, on a observé des niveaux de calcium variant de 55 mg/l à 97 mg/l, avec une concentration moyenne du calcium se chiffrant à 80,26±12,34 (tableau 13). Le forage de Mukozi a noté une valeur minimale de (55 mg/l) en octobre 2025, tandis que le forage du Village a enregistré une valeur maximale de 97 mg/a pour janvier 2026. Selon l'EAC (2022) qui recommande 150mg/l, l'ISO 7980 et l'OMS (2017) avec 100mg/l, tous les lieux testés respectent les normes préconisées. Il n'y a pas de différence notable ($p>0,05$) entre ces valeurs qui sont respectivement de 78,08±8,02 pour Kamenge, 80,16±1,17 pour Ngagara et 81,66±12,88 pour Gihanga. Ces données ont démontré que l'eau prélevée sur l'ensemble des sites respecte les normes de potabilité pour ce paramètre. Les données récoltées dépassent celles d' Adebayo et al (2021) au Nigeria, qui a déterminé une variation de concentration en calcium allant de 10,25 à 19,00 mg/l.

Les résultats sont moins élevés que ceux de Niyomwungere (2024) qui a mesuré des valeurs variant de 89,1 à 119 mg/l avec une concentration moyenne de calcium de 106,2± 9,9 mg/l.

De plus, ils sont également inférieurs à ceux de Kouassi (2021) qui a relevé des valeurs allant de 8,016 mg/l à 44,088 mg/l. Ces résultats pourraient être affectés par les profondeurs des forages.

D'après les données du tableau 14, il a été déterminé avec un niveau de variation entre 11 et 20,04 mg/l et une moyenne de nitrate de 16,765±2,88. Pour le mois d'octobre, la concentration la plus basse a été notée dans les puits de Mirango 10ème avenue avec 11mg/l et à Muhizi à 11mg/l. En revanche, pour le mois de janvier, la concentration maximale a été observée dans le puits de Mirango 11ème avenue. En considérant les standards de l'EAC (2022) qui requièrent des valeurs de 45mg/l, ainsi que ceux de l' OMS (2017) qui demandent 50mg/l. Nos conclusions montrent que l'eau de tous les lieux inspectés respecte les standards de l'EAC (2022) et de l' OMS (2017).

Les moyennes détectées sont statistiquement identiques, sans différence significative ($p>0,05$) dans l'ordre suivant : 15,65±1,3 pour Ngagara, 16,59±2,3 pour Kamenge et 17,9±1,3 pour Gihanga.

Ces résultats diffèrent de ceux de Niyomwungere (2024) qui a rapporté des mesures allant de 10,5mg/l à 59,7 mg/l, avec une moyenne globale de 39,5 ±19,3 mg/l pour tous les forages analysés. Ils sont également supérieurs à ceux de Kouassi (2021) qui avait signalé une variation de 0 mg/l à 1,7 mg/l.

Ces résultats pourraient être affectés par les forages en profondeur, éloignés de rejets industriels et de champs cultivés où l'utilisation d'engrais est pratiquée. Il est possible que même les fosses septiques situées près de ces forages soient parfaitement construites.

Dans cette étude, les résultats ont oscillé entre 0,01 et 2,23 mg/l avec une moyenne de 1,24±0,64 mg/l (tableau 13). Le forage de Mukozi a enregistré la valeur la plus basse avec 0,01 mg/l en octobre 2025, tandis que le forage de Nyabagere a affiché la valeur la plus élevée à 2,23 mg/l au même mois. Il n'y a pas de différence notable ($p >0,05$) entre ces valeurs, dans l'ordre : 1,46±0,45>1,16±0,28>1,13±0,29 respectivement pour Gihanga, Kamenge et Ngagara. Cela pourrait être lié à la proximité des champs cultivés où l'engrais chimique est utilisé.

Conformément aux normes de l'EAC (2022) qui préconisent une limite de 0,9mg/l selon la norme ISO 6777.Les huit forages Mukozi, Mirango 11ème avenue, Mirango Nyabagere, Mubano et Mukozi sont hors normes à cause d'une récente pollution anthropique, notamment des excréments et de l'urine. En revanche, deux forages, Mirango 10ème avenue et village 7, se situent dans la fourchette acceptable pour la potabilité de l'eau selon l'EAC (2022).

Cependant, les règles de l'OMS (2017) imposent une limite de 3mg/l ;par conséquent, tous les forages examinés respectent les standards de l'eau potable.

Tableau 13: Résultats du test ANOVA pour la comparaison de la teneur en fer, manganèse, calcium, nitrates, nitrites entre les zones Gihanga Kamenge, Ngagara et Gihanga

SITES	Turbidité (UTN)	Fe2+ (mg/l)	Mn2+ (mg/l)	Ca2+ (mg/l)	NO_3^{2-} (mg/l)	NO_2^- (mg/l)
1.Kamenge	0,24±0,05^b	0,02±0,03^a	0,01±0,01^a	78,08±8,02^a	16,59±2,31^a	1,16±0,28^a
2.Ngagara	0,73±0,08^c	0,015±0,007^a	0,005±0,007^a	80,16±1,17^a	15,65±1,3^a	1,13±0,29^a
3.Gihanga	0,41±0,16^a	0,011±0,006^a	0,006±0,008^a	81,66±12,88^a	17,9±1,3^a	1,46±0,45^a
Moyenne	0,4±0,22	0,016±0,026	0,009±0,009	80,26±12,34	16,76±2,88	1,24±0,64
Normes EAC	25 UTN	0,3 mg/l	0,1mg/l	150mg/l	45 mg/l	0,9 mg/l
Normes OMS	1 UTN	0,3 mg/l	0,05 mg/l	100mg/l	50 mg/l	3 mg/l

III.2. Paramètres microbiologiques

III.2.1. Résultats microbiologiques de la Zone Kamenge

Les teneurs du tableau 14 ont montré que tous les forages de la zone Kamenge échantillonnés enregistrent des coliformes totaux moyens qui dépassent les limites recommandées. Il en est de même pour les coliformes fécaux et les vibrion cholerae. Seul le forage de Mukozi a affiché des valeurs de Salmonella et Shigella qui sont dans la fourchette normale pour ces paramètres avec 0±0 et 0±0 respectivement. Les autres forages sont hors standards pour les salmonella et shigella.

Tableau 14: Concentrations microbiologiques Zone Kamenge

SITES	Coliformes Totaux	Coliformes fécaux	Escherichia coli	Salmonella	Shigella	Vibrio Cholerae
Mukozi	5,03±4,35^a	5,03±4,35^a	1,5±1,8^b	0±0^b	0±0^b	0,9±1,6^b
Mirango11ème	5,1±4,1^a	5,1±4,1^a	1,8±0,6^{ab}	0,6±1,3^b	0,6±1,3^b	2,5±1,1^{ab}
MirangoNyaba	4±1^a	4±1^a	5,6±1,1^a	2,8±2,5^{ab}	2,8±2,5^{ab}	5,3±1,9^a
Mirango10è	5,9 ±5,2^a	5,9±5,2^a	1,9±3,4^{ab}	5,6±3,1^a	5,6±3,1^a	1,3±1,1^b
Normes EAC	0	0	0	0	0	0
Normes OMS	0	0	0	0	0	0

Il a été montré que les forages de Ngagara sont hors normes pour tous les paramètres microbiologiques analysés (le tableau 15). La même lettre a que tous ces paramètres disposent prouve que les forages analysés à Ngagara n'ont pas de différence significative ($p>0,05$).

Tableau 15: **Paramètres Microbiologiques Zone Ngagara**

Sites	Coliformes Totaux	Coliformes fécaux	Escherichia coli	Salmonella	Shigella	Vibrio Cholerae
Mubano	3±2,61[a]	3±2,61[a]	1,36±2,36[a]	1,4±1,3[a]	1,4±1,3[a]	1,56±1,5[a]
Muhizi	5,13±3,6[a]	5,13±3,6[a]	5,66±4,93[a]	1,26±1,13[a]	1,26±1,13[a]	2,66±3,05[a]
Normes EAC	0	0	0	0	0	0
Normes OMS	0	0	0	0	0	0

Les résultats du tableau 16 montrent que tous les forages de la zone Gihanga analysés ne respectent pas les normes du point de vue microbiologique. Tous ces paramètres n'ont pas de différence significative ($p>0,05$).

Tableau 16: Paramètres Microbiologiques Zone Gihanga

Sites	Coliformes Totaux	Coliformes fécaux	Escherichia Coli	Salmonelle	Shigella	Vibrio Cholerae
Village2	5,7±4,1[a]	5,7±4,1[a]	5,8±2,8[a]	4,5±4,4[a]	4,5±4,4[a]	3,3±3,5[a]
Village5	2,6±2,8[a]	2,6±2,8[a]	2,1±2,7[a]	1,9±1,7[a]	1,9±1,7[a]	2,8±2,5[a]
Village 6	2,26±1,97[a]	2,26±1,97[a]	2,66±4,61[a]	5,06±4,6[a]	5,06±4,6[a]	1,06±1,84[a]
Village 7	4,3±4,9[a]	4,3±4,9[a]	0,6±0,8[a]	1,23±2,13[a]	1,23±2,13[a]	3,8±4,5[a]
Normes EAC	0	0	0	0	0	0
Normes OMS	0	0	0	0	0	0

III.3. Les résultats microbiologiques d'après le test ANOVA de toutes les Zones Kamenge, Ngagara et Gihanga

III.3.1. Les coliformes totaux

Cette étude révèle grâce à ces données (tableau 17) que les taux de coliformes totaux variaient entre 0 et 9,9 UFC/100ml, avec une moyenne de 4,13±2,75 UFC/100ml pour l'ensemble des lieux analysés. Le niveau le plus bas de 0UFC a été déterminé lors des forages effectués en octobre 2025 à Mirango 10ème avenue, Mubano, Village 6 et en janvier 2026 à Village 5 et 7. Par

ailleurs, le pic maximal de 9,9 a été noté sur les sites de Mukozi 13ème avenue ; Mirango 11ème avenue en janvier ainsi qu'à Mirango 10ème avenue en novembre 2025.

Comparativement aux autres forages examinés, les eaux de Mukozi 13ème et de Mirango 10ème sont plus polluées, ceci est dû à leur proximité avec les habitations.

Les moyennes indiquées sont statistiquement identiques, sans différence significative ($p>0,05$), dans le classement suivant 5,04±3,47 >4,42±33,05 >3,74±3,44 pour Kamenge, Ngagara et Gihanga respectivement. Ceci pourrait être associé aux forages situés à proximité des foyers de Kamenge et Gihanga. L'écart entre un forage et une habitation à Kamenge varie de 1 mètre à 12 mètres, et les puits perdus sont situés tout près des résidences. A Gihanga, cette distance s'étend de 10,4 mètres à 29 mètres, et l'emplacement des toilettes est également très éloigné des domiciles.

Les résultats de cette étude sont similaires à ceux de Niyomwungere (2024) ,qui, après ses analyses bactériologiques de 27 échantillons d'eau prélevé dans 9 puits de forages ne sont pas conformes aux normes de l'OMS (2017) et de l'EAC (2022).

Tenant compte des normes de l'EAC (2022) et de l'OMS (2017) qui exigent 0 UFC/100ml.Les forages soumis à l'analyse ne sont pas conformes aux normes de l'eau potable pour ce paramètre. Ces résultats peuvent être associés aux infiltrations des eaux de surface chargées de divers types de déchets.

III.3.2. Les coliformes fécaux

Le tableau 17 illustre la présence de coliformes fécaux (CF) avec une variation allant de 0 à 9,9 UFC/100ml et une moyenne de 4,13±2,75 UFC/100ml sur tous les sites examinés. Le niveau minimal de 0 a été repéré dans les forages Mirango à 10ème avenue, Mubano, Village 6 en octobre 2025 et au Village 5 et 7 en janvier 2026.

Ces forages répondent aux standards recommandés pour l'eau potable. La valeur la plus élevée de 9,9 a été notée aux sites de Mukozi 13ème avenue et à Mirango 11ème avenue en janvier, ainsi qu'au site de Mirango 10ème avenue en novembre 2025. Cela serait attribué aux précipitations qui les ont déplacés jusqu'aux nappes souterraines examinées.

Selon les critères de l'EAC (2022) et de l'OMS (2017) qui demandent une absence totale de UFC/100ml, les forages qui sont analysés dépassent généralement la plage normale de potabilité de l'eau pour ce paramètre. La présence de coliformes fécaux indique une contamination récente par des matières fécales humaines ou animales provenant de l'intestin d'animaux à sang chaud.

La présence de coliformes fécaux dans l'eau potable signale une contamination fécale, ce qui indique un risque élevé lié à la présence de bactéries, virus ou parasites nuisibles.

Cela peut provoquer des gastro-entérites (diarrhées, crampes, nausées), de graves infections comme la dysenterie ou la fièvre typhoïde, et requiert souvent une recommandation d'ébullition.

III.3.3. *Escherichia coli*

Les conclusions ont fluctué de 0 à 8 UFC/100ml, avec une concentration moyenne de 2,98±2,63UFC (tableau17). Le chiffre le plus bas a été observé aux emplacements suivants : Mirango 10ème avenue (0UFC/100ml), Mubano (0UFC/100ml) et Village 6 (0UFC/100ml) en octobre 2025, ainsi qu'à Mukozi 13ème avenue (0UFC/100ml), Mubano (0UFC/100ml), Muhizi (0UFC/100ml), Village 5 (0UFC/100ml) et Village 7 (0UFC/100ml) en janvier 2026. En revanche, la valeur la plus élevée a été enregistrée au Village 6 avec un score de 8 UFC pour 100 ml.

Les lieux mentionnés précédemment affichent des niveaux de 0 UFC/100ml, respectant ainsi les normes de potabilité. Cependant, une valeur maximale de 8 UFC/100ml a été enregistrée au village 6 en novembre 2025. La conformité des lieux échantillonnés aux normes de l'EAC (2022) et de OMS (2017) varie, ces dernières requérant une absence de UFC/100ml pour ce paramètre.

Ceci pourrait être associé aux forages situés à proximité des foyers de Kamenge.

L'écart entre un forage et une habitation peut aller de 1 à 12 mètres, avec des puits perdus situés près des habitations à Kamenge. Pour Gihanga, la distance varie de 10,4 à 29 mètres et il est fréquent que les toilettes soient situées loin des maisons.

III.3.4. Salmonelles

Dans cette étude, des valeurs variant de 0 et 9 UFC/100ml ont été observées, ainsi qu'une moyenne de 2,42±2,5 pour les salmonelles. D'après le tableau17, il est évident que la présence de salmonella est conforme aux normes dans les forages de Mukozi (0UFC/100ml) en octobre, novembre 2025 et janvier 2026 ; Mirango 11ème avenue (0UFC/100ml) en octobre et novembre ; Mirango Nyabagere (0UFC/100ml) en novembre2025, Mubano (0 UFC/100ml), Village 2 (0 UFC/100ml), Muhizi (0 UFC/100ml), Village 5 (0 UFC/100ml), Village 6 (0 UFC/100ml),Alors qu'elle dépasse largement le village 6 (9UFC/100ml).Sur la base des critères de l'EAC(2022) et de l'OMS (2017) exigeant (0UFC/100ml), parmi les 10 points d'échantillonnage, seul le forage situé à la 13ème avenue Mukozi respecte les normes requises.

Ces valeurs ne sont pas conformes aux normes recommandées pour l'eau potable. Ceci pourrait être lié à une contamination fécale résultant de l'infiltration de déchets exposés en surface.

Le protocole d'analyse employé pour détecter les salmonelles est aussi applicable aux shigella. En réalité, il a été observé que la présence des salmonella peut être associée à celle de shigella.

Par conséquent, la présence de Shigella dans l'eau potable peut provoquer la dysenterie bacillaire, une grave infection intestinale qui se caractérise par des excréments sanguinolents, des douleurs abdominales sévères, une forte fièvre et des vomissements.

D'une virulence redoutable, même une petite quantité de bactéries peut provoquer la maladie, accompagnée des risques de déshydratation, d'atteintes neurologiques ou même de décès.

III.3.5. *Vibrio cholerae*

Les valeurs associées au vibrion cholerae obtenues dans cette étude oscillent entre un minimum de 0 UFC et un maximum de 8,9 UFC avec une moyenne générale de 2,42±2,07UFC dans tous les forages échantillonnés (tableau 17).

Les valeurs basses ont été identifiées dans les sites de Mukozi (0UFC/100ml), Mirango10ème Avenue (0UFC/100ml), et Mubano (0UFC/100ml) pour le mois d'octobre 2025 ainsi que dans les sites de Mukozi, Muhizi, Village 2, 5, 6 et 7 avec (0UFC/100ml) pour tous ces sites en mois de Janvier20206.Néanmois les valeurs maximales ont été identifiées dans le site de Village 7 avec 8,9UFC. La teneur moyenne était de 2,42±2,07.

Tableau 17 : Résultats des paramètres microbiologiques tous les sites

Zones	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	*Escherichia Coli*	Salmonella	Shigella	*Vibrio cholerae*
Kamenge	5,04±3,47[a]	5,04±3,47[a]	2,75±2,47[a]	2,25±2,89[a]	2,25±2,89[a]	2,53±2,2[a]
Ngagara	4,42±33,05[a]	4,42±3,05[a]	4,23±4,26[a]	1,31±1,03[a]	1,31±1,03[a]	2,3±2,35[a]
Gihanga	3,74±3,44[a]	3,74±3,44[a]	3,01±3,36[a]	3,18±3,42[a]	3,18±3,42[a]	2,78±3,01[a]
Normes				0		
EAC Normes	0	0	0		0	0
OMS	0	0	0	0	0	0

III.4. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des eaux de forages dans les 7 quartiers

L'analyse de Classification Ascendante Hiérarchique (Figure 21) a été utilisé pour voir les similarités entre les sites en considérant tous les paramètres physico chimiques et microbiologiques étudiés. Le dendrogramme, par la droite verticale qui coupent les blancs les plus long des distances moyennes, selon la méthode de Ward, a permis d'illustrer deux groupes similaires.

A la distance supérieure à 20 selon la méthode de Ward permis d'identifier que l'eau du village5 et de Muhizi sont similaires (1er groupe) d'un part et que les eaux de Village 6, Miango11ème avenue, Mubano, Village2, Mukozi 13ème avenue ; Village 7, Mirango 10ème avenue, Mirango Nyabagere (2ème groupe) sont similaires d'autre part. Les eaux du 1er groupe ont été rapproché par leur teneur en E. coli (5,66), la température (environ tous les deux 26°) et NO_2^- (environ 1,3 mg/l). A la distance de 15 toujours selon Ward a montré 2 groupes similaires notamment :

- ✓ Groupe1 composé de 2forages Village5 et Muhizi ;
- ✓ Groupe 2formé de Village 6 et Mirango 11ème avenue ;
- ✓ Groupe3 composé de Mubano, Village2, Mukozi 13ème avenue, Village7, Mirango10ème avenue et Nyabagere.

La distance de 10 a mis en évidence 4 groupes (figure 21)

- ✓ Groupe1 avec Village 5 et Muhizi
- ✓ Groupe2 Village 6 et Mirango11ème avenue
- ✓ Groupe3 Mubano, Village2 et Mukozi 13 ème avenue
- ✓ Groupe 4Village 7, Mirango 10ème avenue et Mirango Nyabagere.

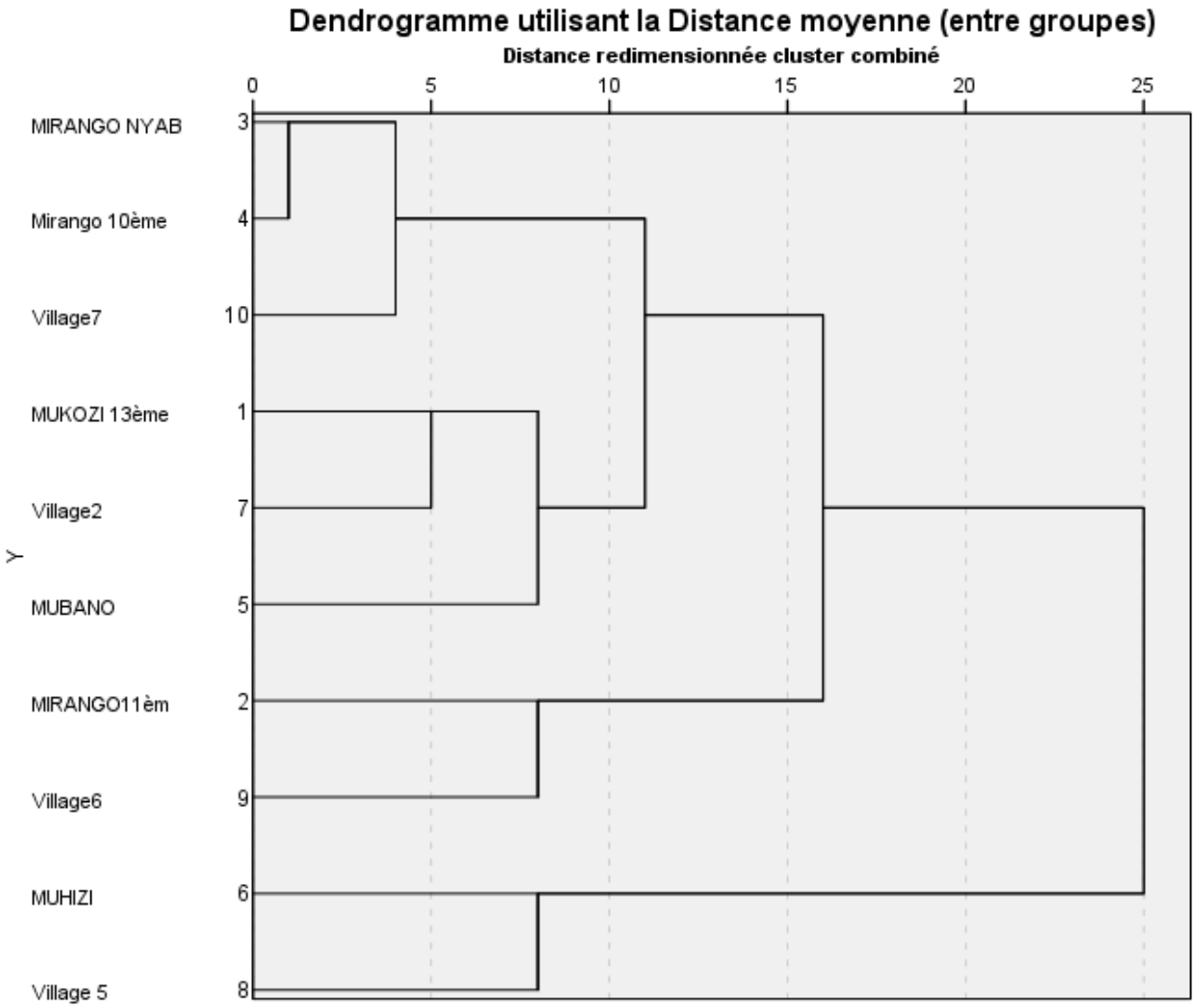


Figure 3: Classification Ascendante Hiérarchique ou CAH des eaux de forages dans les 7 quartiers

CONCLUSION

A l'issu de ce travail portant sur le contrôle de la qualité des eaux de forages de la ville de Bujumbura et ses périphéries en particulier dans la Zone Gihanga en commune Mpanda dans le cadre de l'évaluation des risques pour protéger la santé de la population si la situation l'impose, une étude analytique qui s'est réalisée pendant la période du mois d'Octobre 2025 au mois de Janvier 2026.

En somme 10 forages choisis ont été échantillonnés au cours de cette période. Chaque forage a été échantillonné 3 fois soit 30 échantillons collectés dans des moments différents. Nous pouvons dire que les objectifs que nous nous sommes fixés à l'avance ont été atteints. En effet, divers paramètres physico chimiques tels que pH, conductivité, la température, turbidité, nitrites, dureté totale, calcium, salinité, fer, nitrates, manganèse et les paramètres microbiologiques en particulier coliformes totaux, coliformes fécaux et les salmonella, shigella, *Escherichia coli*, ont été étudiés.

Pour les paramètres physicochimiques, les résultats de cette recherche ont montré que ceux-ci respectent les normes de l'EAC (2022) et celles de l' OMS (2017) à l'exception de la salinité (taux de conformité=10%) et la conductivité (taux de conformité=80%) ce qui expose la population utilisatrice aux risques des eaux fortement salées et troublées.

Les résultats de ce travail montrent que l'eau de forage puisée dans tous les sites ont un pH acceptable d'après les standards de l'EAC (2022) avec (5,5<pH>9,5) et ceux de l'OMS (2017) (6,5<pH>8,5) car le pH moyen était de 7,43± 0,54 et variait de 7,01 à 8,22. Les données de pH de tous les sites ont été soumises au test ANOVA pour comparer les moyennes ont montré que toutes les moyennes sont statistiquement égales avec 7,33±0,25 ,7,3±0,18 et 7,62±0,86 respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga.

Deux sites sur 10 ont affiché des valeurs moyennes de conductivité qui ne respectent pas les normes de l'EAC (2022) ni de l' OMS (2017) soit un taux de conformité de 80%. C'est le cas de Muhizi (Ngagara) et village 5 (Gihanga) avec respectivement 371,5±13,5µS/cm et 366±9µS/cm. La valeur acceptable de la conductivité devra être inferieure % 2500 µS/cm et comprise entre 500 et 1500 µS/cm respectivement pour les normes de pas les normes de l'EAC (2022) ni de l'OMS (2017).

Les résultats de ce travail montrent également que les eaux de forages explorés ont généralement des températures acceptables selon l'OMS (2017) (25<T°> 30°C) avec T°C =26,63±0,1 T°C=26,83±0,24 T°C=26,21±0,78 à Kamenge, Ngagara et Gihanga respectivement, toutes les trois moyennes ont été statistiquement égales.

Les faibles valeurs et les fortes valeurs de solides totaux dissous ont été enregistrées dans les sites de Mubano et Muhizi, tous de Ngagara avec TDS=189 mg/let TDS=800mg/l. Tous les sites d'études confondus, la moyenne a été de 373,43±118,53 mg/l. Seul le site Muhizi de Ngagara a révélé une valeur de TDS hors normes de l' OMS (2017) qui conseillent des valeurs de TDS <600 mg/l. Ainsi ; il a été trouvé TDS=363,83±63,02' TDS=367,66±250,55 et TDS=385,9±78,21[a] respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga, des valeurs statistiquement non différentes. (C=0,35±0,14) avec une concentration moyenne générale qui excède le seuil selon les normes de l'OMS indiquant que la concentration moyenne d'une eau consommable doit être égale à 0,2g/l en terme de salinité. Un seul site soit un taux de conformité de 10% a révélé une salinité acceptable à Muhizi (Ngagara) avec une concentration moyenne de 0,08 mg/l. Il é été constaté des concentrations moyennes de 0,34±0,08 ;0,39±0,36 ; 0,35±0,01 respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga, toutes statistiquement égales.

Les résultats de la turbidité ont montré que les eaux analysées ne sont pas extrêmement troublées (UTN=0,4±0,22), la moyenne obtenue étant inférieure au seuil de conformité recommandé par l'OMS (2017), qui indique que la turbidité ne doit pas dépasser 1 UTN pour une eau à usage domestique. Des valeurs de turbidité dont UTN=0,24±0,05' UTN =0,73±0,08 et UTN =0,41±0,16 ont été obtenues respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga, toutes statistiquement différentes.

Les concentrations en fer de 0,02±0,03 mg/l ; 0,015±0,007[a] mg/l et de 0,011±0,006 mg/l ont été registrées respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga ; toutes statistiquement égales. Il a été ainsi révélées que les eaux des forages explorées ont des concentrations en fer globalement normales car la teneur en fer était de 0,016±0,026 mg/l, une valeur inférieure à 0,3 mg /l, la valeur maximale selon les normes de l'EAC (2022) et de l' OMS (2017).Compte tenu des normes fixées par l' OMS (2017) qui sont fixés à 0,05 mg/l ; il est à constater que les concentrations en manganèse sont acceptables car la concentration moyenne a été de 0,009±0,009 mg/l.

Des concentrations en fer de 0,01±0,01 mg/l ; 0,005±0,007 mg/l et de 0,006±0,008 respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga, toutes statistiquement égales.

Tous les sites confondus, Il a été constaté que tous les échantillons respectent les normes suggérées par l'EAC (2022) et OMS (2017) qui exigent respectivement une valeur inférieure à 150mg/l et 100mg/l pour des concentrations acceptables en calcium, la moyenne générale étant de 80,26±12,34 mg/l. Ont été trouvées des moyennes de 78,08±8 mg/l,02 80,16±1,17 mg/l et de 81,66±12,88 mg/l respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga, toutes statistiquement égales.

En conformité avec les critères de l'EAC (2022) qui requièrent des valeurs de 45mg/l et celles de l'OMS (2017) qui exigent 50mg/l, ces résultats indiquent que l'eau de tous les sites visités sont conformes aux normes avec une concentration en nitrates moyenne de 16,76±2,88 mg/l. Les concentrations en nitrates de 16,76±2,88mg/l ; 16,59±2,31 et de 15,65±1,3 ont été registrées respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga ; toutes statistiquement égales.

Les résultats d'analyse des teneurs en nitrites ont révélé que les eaux des forages examinés sont globalement excessivement concentrées en nitrites selon les standards de l'EAC (2022) qui recommande une valeur maximale de 0,9mg/l. En effet, la concentration globale a été de 1,24±0,64 mg/l. Des valeurs de 1,16±0,28 mg/l ; 1,13±0,29 mg/l et 1,46±0,45mg/des valeurs hors normes et statistiquement égales. Du point de vue microbiologique, il ressort des résultats de cette étude que les eaux de forages explorés sont généralement pollués. Le risque de contamination microbienne est donc élevé ce qui expose la population environnante aux maladies hydriques.

Selon les normes de l'EAC (2022) et de l'OMS (2017), l'eau est jugée potable lorsque 'elle ne contient aucun agent microbien. Ainsi, il été obtenu des valeurs de 5,04±3,47 UFC , 4,42±33,05 UFC ;3,74±3,44UFC respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga pour les coliformes totaux ; de 5,04±3,47UFC 4,42±3,05 UFC ^{et} 3,74±3,44 UFC respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga pour les coliformes fécaux ;de 2,75±2,47 UFC, 4,23±4,26 UFC et 3,01±3,36 UFC respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga pour les Escherichia coli ; de 2,25±2,89 UFC,1,31±1,03 UFC et 3,18±3,42 UFC respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga pour les Salmonella ;de 2,25±2,89 UFC ,1,31±1,03 UFC et 3,18±3,42 respectivement à Kamenge,

Ngagara et Gihanga pour les Shigella et de 2,53±2,2 UFC ;2,3±2,35 UFC et 2,78±3,01 UFC respectivement à Kamenge, Ngagara et Gihanga pour les vibrio cholerae, pour chaque microbe étudiée ; les valeurs de UFC obtenues à Kamenge, Ngagara et Gihanga sont statistiquement égales.

Concernant les hypothèses de recherche, il ressort de cette étude que pour les paramètres physicochimiques et microbiologiques, les résultats obtenus ont prouvé que la première hypothèse a été infirmée alors que la deuxième hypothèse a été confirmée. La turbidité et la conductivité ont montré que la troisième hypothèse a été confirmée, les autres paramètres restants ont montré que la 3ème hypothèse a été infirmée. En effet, sur onze paramètres mesurés, seuls deux ont été révélés non conformes aux normes de l'EAC (2022) et de l'OMS (2017). C'est le cas de la salinité et de la concentration en nitrites.

Quant aux paramètres microbiologiques, tous les échantillons ont été testés positifs alors que pour une eau potable, tout agent microbien doit être absent. Les résultats du test ANOVA pour comparer les moyennes obtenues des paramètres physico chimiques ont montré qu'il y a une différence statistiquement significative entre les résultats de la ville de Bujumbura et de Gihanga uniquement pour la conductivité et la turbidité.

Les résultats de la ville de Bujumbura et de Gihanga ont été statistiquement égaux du côté microbiologique. D'où la troisième hypothèse a été infirmée.

RECOMMANDATIONS

Dans le cadre de cette recherche, il est indispensable de formuler des conseils :

- Au gouvernement du Burundi via le MSPLS, MEAE
  - Développer les systèmes d'évacuation des eaux usées dans l'ensemble des quartiers de Kamenge, Ngagara et Gihanga.
  - Eviter les puits perdus et les zones agricoles, sources de pollution pour les forages
  - Fournir une quantité adéquate d'eau potable dans chacun des quartiers Kamenge, Ngagara et Gihanga à travers un système de fontaine publique ;
  - Observer et analyser de manière qualitative et quantitative les eaux de forage dans tous ces quartiers parcourus.
  - Etablir un bureau burundais dédié à la surveillance et au contrôle de la qualité de l'eau, avec une attention particulière portée aux forages.
- Aux autorités sanitaires et administratives de ces quartiers de la zone Kamenge, Ngagara et Gihanga
  - Il est important d'informer régulièrement aux habitants des quartiers Kamenge, Ngagara et Gihanga les effets néfastes liés à la consommation d'eau de forage qui ne respecte pas les standards de l'EAC.
  - Il s'agit de renforcer les stratégies sur le changement de comportement au sein des quartiers Kamenge, Ngagara et Gihanga, grâce à l'intervention des promoteurs de Santé dans le cadre de la prévention des maladies liées à l'eau.
  - Il faut veiller à ce que la profondeur des forages soit conforme aux standards internationaux en fonction du type de sol.
- A l'administration locale de tous ces quartiers de la zone Kamenge, Ngagara et Gihanga
  - Mettre en œuvre des méthodes de sensibilisation auprès du public afin d'éviter le dépôt des déchets n'importe où ;

- Engager et éduquer la communauté pour prévenir la construction de latrines à proximité des puits de forage ;
- S'abstenir d'installer des puits de forage près des rivières ou des latrines.
- Planifier des visites à domicile pour contrôler l'application des normes d'assainissement, d'hygiène et de protection de l'environnement, informer la population sur l'importance de faire bouillir l'eau à 100°C pour éliminer les microbes contaminants.

❖ A l'intention de la population

- Posséder des connaissances sur la protection des forages ;
- Eviter le nettoyage manuel des fosses septiques dans les logements ;
- Appliquer des normes d'hygiène et de propreté,
- Garantir une gestion efficace des déchets solides et liquides.
- Bouillir l'eau de forage avant de l'utiliser
- Eviter de boire l'eau de forage

❖ Pour les scientifiques

- Etudier la concentration de métaux lourds et de pesticides dans l'eau de forage
- Réaliser une analyse de la contamination de la nappe phréatique.
- Chercher les produits adéquats pour la purification des forages contaminés

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Affect, S. (2021). *La salinisation , ses causes et impacts*. 3.

Alassa, M. (2016). *CONTRIBUTION A L ' ETUDE DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE QULQUES EAUX DE*. UNIVERSITE DE YAOUNDE I ECOLE NORMALE SUPERIEURE.

Amina. (2010). *MEMOIRE Option : Santé , Eau et Environnement Thème Microbiologie et physico-chimie de l ' eau des puits et des sources de la région de Guelma (Nord-Est de l ' Algérie)*. GUELMA.

Anne. (2020). *DOSSIER PEDAGOGIQUE L ' eau et la santé*. 1–19.

Bensalah. (2021). *Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines brutes dans la wilaya de Constantine* . Université des Frères Mentouri Constantine 1 Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie 1.

Berne. (2010). *> Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau*. 46.

Ceci, L. (2021). *Les nitrates dans l ' eau de puits*. *05*, 3.

Codex Alimentarius. (2022). *RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL PHYSIQUE SUR L'AVANT-PROJET DE DIRECTIVES DE SECURITE SANITAIRE POUR L'UTILISATION ET LE RECYCLAGE DE L'EAU DANS LA PRODUCTION ET LA TRANSFORMATION DES ALIMENTS*.

Diallo, M. B., Kante, C., Bangoura, M., Diami, A., Diallo, M. B., Kante, C., Bangoura, M., Diami, A., & Détermination, D. (2018). *Détermination de quelques paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux des puits de la commune urbaine de Mamou (République de Guinée) To cite this version : HAL Id : hal-01731373*. 13.

EAC. (2022). *Potable water — Specification DEAS 12: 2022 ICS 13.060.20 EAST*. 22.

Elyes, K. (2019). *Mémoire de fin de cycle en vue d'obtention du diplôme de Master En sciences Economiques Option : Economie de la santé Thème : La résurgence des maladies à transmission hydrique en Algérie : la collaboration intersectorielle cas de la Wilaya Tizi-Ouzou Réa*.

Essouli. (2024). *HYDROCHIMIE , QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE LA PARTIE NORD DE BRAZZAVILLE (REPUBLIQUE DU CONGO)*. *15*, 15. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.20241511.0953

Fallou. (2024). *GUIDE TECHNIQUE SUR LA MESURE DE TURBIDITÉ ET LA CONCENTRATION EN MATIÈRES EN SUSPENSION PRÉCISIONS MÉTHODOLOGIQUES ET APPLICATION AU*.

Hadj. (2020). *Caractères Physiques de l ' eau potable Plan : Densité Température Potentiel d ' Hydrogène Conductivité électrique Radioactivité*.

Hadji, D. (2020). *Microbiologie de l ' eau*.

Helene, S. (2021). *Le manganèse dans l ' eau potable*. 1–2.

HERMANN. (2006). *Eau – Assainissement – Hygiène pour les populations à risque*. 785.

IBRAHIM ADEBAYO, VICTOR ETIM NYONG, C. P. O. E. G. A. (Reçu. (2021). *PARTIES*.

Ilias, M. (2024). *Mémoire En Vue de l ' Obtention du Diplôme de Master Thème Etude et suivi de la qualité physico-chimique de l ' eau potable dans la région de Guelma*. Université 8 Mai 1945 Guelma Faculté.

KARAMBIRI. (2023). *de la ville de Dédougou , Burkina Faso Résumé Abstract*. *23*(2), 1–13.

Kloppmann. (2011). *Méthodologie de diagnostic de l ' origine de la salinité des masses d ' eau . Emploi des outils géochimiques ,*. 129.

KOUASSI. (2021). *EVALUATION DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE BIODIVERSITE ET Ministère de l'Enseignement Supérieur et THEME : N°D'ORDRE :…….. DES EAUX DE FORAGES DANS DES VILLAGES DE de la Recherche Scientifique UFR ENVIRONNEMENT ECOLOGIE N° CARTE D'ETUDIANT : TROPICA*. UNIVERSITE JEAN LOROUGNON GUEDE.

Kouassi et al. (2017). *ANALYSE DES IMPACTS HYDROLOGIQUES DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQ UE EN AFRIQUE DE L ' O UEST : CAS DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA EN COTE D ' IV OIRE*. 22.

Kounampo-okouo, A. C., Engambe, C. B., Lady, M., Banzouzi, K., Nsona, P. M., Claude, J., Mafoumba, B., Tchoumou, M., Appliquées, S., Guesso, U. D. S.-N., & Congo, R. (2024). *Evaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux à usages domestiques du quartier Kahounga , Brazzaville , République du Congo Evaluation of the physicochemical and microbiological quality of water for domestic use in the Kahounga dis*. *18*(December), 10. https://doi.org/https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v18i6.26

Lukonga, r L. (2002). *L'eau et la santé*. 21.

M.E.E.A.T.U. (2009). *POLITIQUE NATIONALE DE L'EAU*.

Madison. (2017). *Bacteriological Contamination of Drinking Water Wells*. 6.

Magdélina. (2022). *Gestion de la qualité de l'eau*. 1–4.

Majdoub, R., Labidi, M., & Guay, K. (2003). *Revue de littérature IMPACT DE L ' UTILISATION DES ENGRAIS DE FERME SUR LA QUALITÉ MICROBIOLOGIQUE DE L ' EAU SOUTERRAINE*. 136.

Messikh. (2020). *Etude de la qualité physico-chimique et organoleptique des eaux destinées à la consommation humaine du forage Ras El Ain (Boumerzoug) Constantine.* Université des Frères Mentouri Constantine 1.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE, D. L. E. D. L., & Guide. (2015). *Guide technique de réalisation , de protection , de gestion et d ' abandon des forages d ' eau*.

N.U. (2021). *LA VALEUR DE L ' EAU*. 12.

Naomie. (2019). *Optimisation du système de potabilisation de l ' eau de la rivière Mé*.

NDONGO. (2016). *Contribution à l ' étude des paramètres physico-chimiques de quelques eaux de forage de la zone de Mendong - Simbock à Yaoundé*. 80.

NIAKATE.et al. (2023). *analysées au laboratoire national de la santé entre 2016 et 2019*. *22*(3) 11.

NIYOMWUNGERE. (2024). *Contribution à l ' étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage dans la commune Mutimbuzi (Province de Bujumbura).* UNIVERSITE DU BURUNDI.

OMS. (2017). *DIRECTIVES SUR LA QUALITÉ DE L ' EAU DE BOISS ON*.

Ouafa, M., & Randa, T. M. (2018). *Dédicaces Je dédie ce modeste travail à :* Université des Frères Mentouri Constantine1.

Ousmane. (2024). *Manuscript Info Abstract Introduction : - ISSN : 2320-5407 Objectifs : -*. *12*(12), 8. https://doi.org/10.21474/IJAR01/19993

Sacheli, P. M. et R. (2017). *Rapport concernant la Culture M / 14194 : Vibrio cholerae (selles) « Echantillon de selles d ' un patient avec des vomissements et une diarrhée suite à l ' ingestion de fruits de mer » Document préparé par Pierrette Melin , Centre National de Référence*.

Saisine. (2021). *Salmonella spp* . 1–4.

Savina, A. (1994). *L ' alimentation en eau en milieu urbain dans les quartiers defavorises Dne question de partage ?* 28.

Sawadogo. (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*. *17*(October), 2 of 14.

Serge. (2000). *Suivi de la qualité de l ' eau des rivières et petits cours d ' eau Par*.

Smith. (2013). *Introduction à l'Analyse de Qualité de l'Eau de Boisson*.

Stephen J. Schneider, BSME, M. steve@schneiderwater. co. (2014). *GUIDE D ' INSTALLATION DE FORAGE POUR L ' ALIMENTATION EN EAU PAYS EN VOIE*. 64.

Tazi, L. L. et A. (2025). *Vibrio cholerae (Agent du choléra)*.

Verhille, S. (2013). *Les indicateurs microbiens dans l ' évaluation de l ' eau potable : interpréter les résultats de laboratoire et comprendre leur signification pour la santé publique Les indicateurs microbiens les plus courants et leur utilisation actuelle*. 1–13.

Viland, M., Montiel, A., Duchemin, J., Larivière, M., & Zarrabi, P. (2001). *Eau et Santé Guide pratique pour les intervenants en milieu rural africain*. 114.

Wided, A. L. ? M. (2019). *Mémoire de projet de fin d ' études Eau : Étude Physico-Chimique et Bactériologique*. Universit Guelma Faculté.

ANNEXES

Annexe 1: Sites d'échantillonnage

Numéro	Date de prélèvement	Forages	Distance avec la maison
1	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Mukozi ;13eme Avenue	5m
2	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Mirango ;Nyabagere	3,24cm
3	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Mirango;10eme avenue	12m
4	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Mubano(ngag2)	5m
5	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Muhizi(NGAG4)	6,62m
6	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Mirango 11^{e} ave	1m
7	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Gihanga Village 2	3,60m
8	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Gihanga, Village 5	18,8m
9	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Gihanga Village 6	24m
10	Le 3/10/2025 Le 9/12/2025 Le 26/01/2026	Gihanga ,Village7	29m

Annexe 2 : Résultats physicochimiques brutes de la zone Kamenge

Sites	Période	pH	Condictivité (µS/cm)	T°	TDS mg/l	Salinité (g/l)	Turbidité (UTN)	Fe^{2+} mg/l	Mn^{2+} mg/l	Ca^{2+} mg/l	$NO3^{2-}$ mg/l	NO^{2-} mg/l
Mukozi13ème	Oct	7,11	639	26,68	425	0,41	0,25	0,02	0,01	55	15,6	0,51
Mukozi 13ème	Nov	7,08	629	26,68	415	0,4	0,15	0,15	0,01	75	12	1,01
Mukozi13ème	Janv	7,09	634	26,77	420	0,405	0,2	0,01	0,01	85	20,01	2,02
Mirango 11ème	Oct	7,54	851	26,68	425	0,41	0,25	0	0	77	20,4	1,01
Mirango 11ème	Nov	7,5	815	26,68	405	0,41	0,15	0	0,01	67	17	1,04
Mirango 11ème	Janv	7,52	833	26,68	420	0,405	0,2	0	0	87	19	1,21
Mirango.Nyabagere	Oct	7,16	605	26,63	303	0,29	0,3	0,02	0,01	74	16	2,23
Mirango.Nyabagere	Nov	7,1	650	26,36	330	0,19	0,2	0,02	0,01	64	20,04	1,3
MirangoNyabagere	Janv	7,13	627,5	26,495	306,5	0,29	0,25	0,025	0,01	84	18	1,03
MirangoI 10 avenue	Oct	7,58	620	26,63	301	0,39	0,35	0,01	0,03	93	11	1,01
MirangoI 10 avenue	Nov	7,55	602	26,63	310	0,2	0,25	0,01	0,03	83	18	0,5
Mirango10 avenue	Janv	7,565	611	26,63	305,5	0,25	0,3	0,01	0,03	93	12	1

Annexe 3 : Résultats physicochimiques brutes de la zone Ngagara

SITES	Période	pH	Condictivité (µS/cm)	T°	TDS mg/l	Salinité (g/l)	Turbidité (UTN)	Fe^{2+} mg/l	Mn^{2+} mg/l	Ca^{2+} mg/l	NO_3^- mg/l	NO_2^- mg/l
Mubano	Oct	7,51	569	27	800	0,8	0,85	0,01	0,01	96	17	0,7
Mubano	Nov	7,53	596	27	420	0,5	0,75	0,01	0,01	86	20,03	1,03
Mubano	Janv	7,25	582,5	27	414,5	0,65	0,8	0,01	0,01	56	12,7	1,05
Muhizi	Oct	7,3	385	26,75	192	0,18	0,7	0,02	0	91	15	1,01
Muhizi	Nov	7,04	358	26,57	189	0,08	0,65	0,02	0	81	18,2	2,01
Muhizi	Janv	7,17	371,5	26,66	190,5	0,13	0,675	0,02	0	71	11	1,01

Annexe 4 : Résultats physicochimiques brutes de la zone Gihanga

Sites	Période	pH	Condictivité (µS/cm)	T°	TDS (ppm)	Salinité (g/l)	Turbidité (UTN)	Fe^{2+}(mg/l)	Mn^{2+}(mg/l)	Ca^{2+}(mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)
Village2	Oct	7,01	529	25,78	435	0,31	0,15	0,01	0,01	66	17,5	2,11
Village2	Nov	7,01	592	26,78	453	0,41	0,51	0,01	0,01	62	20,03	1,12
Village2	Janv	7,01	560,5	26,28	444	0,36	0,33	0,01	0,01	85	16,8	2,13
Village5	Oct	8,22	375	25,65	252	0,28	0,7	0,02	0	95	16,9	1,11
Village5	Nov	8,22	357	27,65	352	0,38	0,6	0,02	0	94	17,6	1,13
Village5	Janv	8,22	366	26,65	302	0,33	0,65	0,02	0	97	20,04	2,11
Village6	Oct	7,34	741	25,58	465	0,31	0,2	0	0	95	15,6	1,12
Village6	Nov	7,34	714	24,58	456	0,4	0,41	0,01	0	89	14	2,13
village6	Janv	7,34	727,5	25,08	460,5	0,355	0,305	0,005	0	86	17	2,17
Village7	Oct	7,06	515	25,43	253	0,39	0,3	0,01	0,01	77	15	0,2
Village7	Nov	7,06	551	28,43	453	0,49	0,5	0,01	0,01	65	19,5	2
Village7	Janv	7,565	611	26,63	305,5	0,25	0,3	0,01	0,03	69	20	0,3

Annexe 5 : Les résultats brutes des paramètres microbiologiques Zone Kamenge, Ngagara, Gihanga

Sites	Période	Coliformes totaux	Coliformes fécaux	*Escherichia coli*	Salmonella	Shigella	*Vibrio cholera*
Zone Kamenge							
Mukozi 13ème	Oct	1,5	1,5	1	0	0	0
Mukozi 13ème	Nov	3,7	3,7	3,5	0	0	2,8
Mukozi 13ème	Janv	9 ,9	9 ,9	0	0	0	0
Mirango11èm	Oct	2,6	2,6	2,4	0	0	1,2
Mirango11èm	Nov	3	3	1,2	0	0	3,4
Mirango11èm	Janv	9,9	9,9	2	1,8	1,8	3
Mirango Nyabage	Oct	3	3	7	5	5	3,5
Mirango Nyabage	Nov	5	5	5	0	0	5
Mirango Nyabage	Janv	4,2	4,2	5	3,4	3,4	7,4
Mirango 10ème	Oct	0	0	0	2,9	2,9	0
Mirango 10ème	Nov	9 ,9	9 ,9	5,9	9	9	2,1
Mirango 10ème	Janv	7,8	7,8	0	4,9	4,9	2
Zone Ngagara							
Mubano	Oct	0	0	0	1,6	1,6	0
Mubano	Nov	4,8	4,8	4,1	2,6	2,6	1,7
Mubano	Janv	4,2	4,2	0	0	0	3
Muhizi	Oct	5	5	8	2,2	2.2	2
Muhizi	Nov	1,6	1,6	9	1,6	1,6	6
Muhizi	Janv	8,8	8,8	0	0	0	0
Zone Gihanga							
Village2	Oct	1,6	1,6	9	4,6	4,6	3
Village2	Nov	5 ,9	5 ,9	3 ,5	8,9	8,9	7,1
Village2	Janv	9,8	9,8	5	0	0	0

Village 5	Oct	2,2	2,2	1,2	3,4	3,4	3,6
Village 5	Nov	5,7	5,7	5, 3	2 ,4	2 ,4	4,9
Village 5	Janv	0	0	0	0	0	0
Village6	Oct	0	0	0	6,2	6,2	0
Village6	Nov	3,6	3,6	8	9	9	3,2
Village6	Janv	3,2	3,2	0	0	0	0
Village7	Oct	3,2	3,2	1,2	0	0	2,7
Village7	Nov	9,7	9,7	3 ,5	3,7	3,7	8,9
Village7	Janv	0	0	0	0	0	0