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

# Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage dans la commune Mutimbuzi (Province de Bujumbura)

**NIYOMWUNGERE, Mathias; Sous la direction de : Directeur : Dr Prudence BARARUNYERETSE; Co-directeur : Msc Astère NIMUBONA**

**2024-05**
UB, FACULTE DES SCIENCES
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/951

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

UNIVERSITE DU BURUNDI

FACULTE DES SCIENCES

MASTER EN SCIENCES ET GESTION INTEGREE DE L'ENVIRONNEMENT

# Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage dans la commune Mutimbuzi (Province de Bujumbura)

**Par :**

**Mathias NIYOMWUNGERE**

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du :

Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

Spécialité : Eau et Assainissement

Sous la direction de :

Directeur : Dr Prudence BARARUNYERETSE

Co-directeur : Msc Astère NIMUBONA

Bujumbura, Mai 2024

**MEMBRES DU JURY**

Président : Dr. Ir Lambert NIYOYITUNGIYE

Directeur : Dr Prudence BARARUNYERETSE

Co-directeur : Msc Astère NIMUBONA

Secrétaire : Prof Simon BUHUNGU

**DEDICACE**

A Dieu le Tout Puissant ;

A mes regrettés parents ;

A ma chère épouse ;

A mes enfants ;

A mes frères et sœur ;

A tous mes amis et connaissances.

Je dédie ce mémoire

**REMERCIEMENTS**

Au terme de ce travail, qu'il nous soit permis d'adresser nos sincères remerciements à différentes personnalités qui ont contribué à la réalisation de ce travail. Nous remercions très vivement nos parents qui nous ont montré le chemin de l'école. Nos remerciements s'adressent respectivement aux Directeur et co-directeur de ce mémoire Dr BARARUNYERETSE Prudence et Msc NIMUBONA Astère, qui ont bien voulu mettre à notre disposition leur temps malgré leurs nombreuses préoccupations, leurs conseils et remarques nous ont été très bénéfiques dans la réalisation de ce travail. Notre profonde gratitude s'adresse aussi aux techniciens de de Laboratoire de l'Université du Burundi, faculté des Sciences, qui nous ont assistés à l'analyse des paramètres physico-chimiques et microbiologiques.

Nous tenons à remercier notre chère épouse Cadeau SINZINKAYO qui s'est donnée corps et âme directement ou indirectement dans la réalisation de ce travail malgré ses multiples tâches Nos remerciements sont adressés à notre sœur et nos frères pour leur contribution jusqu'à l'aboutissement de ce travail, nous n'avons rien à leur offrir de plus le Tout puissant vous récompensera. Nos vifs remerciements vont également à tout le corps enseignants et administratifs de l'Université du Burundi pour la qualité de notre formation qui nous a amené à arriver à cette étape. Nos remerciements s'adressent ensuite à l'endroit de l'administration de la commune Mutimbuzi qui nous a fournir les données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Enfin, merci à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

**RESUME**

L'eau de forage provenant des nappes d'eau souterraine est naturellement alimentée par l'eau de surface, grâce aux précipitations, aux cours d'eau et aux infiltrations. Cette eau peut être vulnérable à la contamination suite aux activités humaines, au mauvais aménagement des lieux et le dépôt des déchets dans des sites inappropriés.

Dans la présente étude qui vise à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage utilisée par la population, des paramètres physico-chimiques comme pH, température, turbidité, oxygène dissous, nitrates, nitrites, dureté totale, calcium, magnésium, fer, phosphates et des paramètres microbiologiques tels que les coliformes totaux, coliformes fécaux, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, salmonelles ont été évalués durant le mois de novembre 2023 au mois de février 2024, sur 27 échantillons des eaux de forage dont chaque forage a été prélevé 3 fois dans les moments différents.

Les résultats des analyses physico-chimiques et microbiologiques ont montré que sur18 paramètres physico-chimiques et microbiologiques analysés, 12 paramètres ne répondent pas aux normes de l'OMS, en l'occurrence la température, turbidité, oxygène dissous, nitrites, dureté totale, calcium, magnésium, fer, phosphates, coliformes totaux, coliformes fécaux et salmonelles. Du point de vue microbiologique, les puits de forage étudiés présentent une pollution bactériologique dans tous les forages à l'exception des forages construits par la Regideso. Cette pollution affecte l'environnement et constitue une menace majeure sur la santé de ces habitants. Pour éviter la contamination de la nappe phréatique, il faut bien aménager et viabiliser le milieu où on construit des forages, ensuite empêcher la construction des forages tout près des zones humides (rivières, lac, ravins, milieux rizicoles etc…) enfin il faut procéder à un traitement des eaux de forages avant l'utilisation.

Mots clés : Eaux de forage, Microbiologie et Physico- chimie, Commune Mutimbuzi

**SUMMARY**

Water from boreholes coming from groundwater is naturally supplied by the surface water, thanks to precipitation, rivers and infiltrations. This water can be vulnerable to contamination following to human activities, poor development places and deposing waste in inappropriate sites. The following research aims to assess the physico-chemical and microbiological quality of borehole water used by the population, physico-chemical parameters such as color, odor, pH, temperature, turbidity; dissolved oxygen, nitrates, nitrites, total hardness, calcium, magnesium, iron and microbiological parameters such as total coliforms, fecal coliforms, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, salmonella were evaluated during the month of november 2023 to february 2024, on 27 samples of water from boreholes from which each borehole was 3 times at different times, intended for human consumption.

The results of the physico-chemical and microbiological analyzes showed that out of 18 physico-chemical and microbiological analyzes, 12 parameters do not meet WHO standards. These include temperature, turbidity, dissolved oxygen, nitrites, total hardness, Calcium, Magnesium, Iron, Total coliforms, fecal coliforms and salmonella. From a microbiological point of view, the drillings studied present bacteriological pollution in all drillings with the exception of the drillings built by Regideso.

This pollution affects the environment and constitutes a major threat to the health of these inhabitants. To avoid contamination of the water table, it is necessary to properly develop and service the environment where boreholes are built, then prevent the construction of boreholes very close to wetlands (rivers, lakes, ravines, rice-growing areas, etc.) and finally drilling water must be treated before use.

Keywords: Borehole water, Microbiology, Physico-chemistry, Mutimbuzi Commune

**TABLE DES MATIERES**

**MEMBRES DU JURY** ..... **i**
**DEDICACE** ..... **ii**
**REMERCIEMENTS** ..... **iii**
**RESUME** ..... **iv**
**SUMMARY** ..... **v**
**TABLE DES MATIERES** ..... **vi**
**SIGLES ET ABREVIATIONS** ..... **ix**
**LISTE DES TABLEAUX** ..... **x**
**LISTE DES FIGURES** ..... **xi**
**AVANT-PROPOS** ..... **xii**
**0. INTRODUCTION GENERALE** ..... **1**
1. Problématique et objectifs ..... 2
2. Hypothèse de recherche ..... 4
3. Limite de l'étude ..... 4
4. Plan du travail ..... 4
**CHAPITRE. I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES EAUX DE FORAGE** ..... **5**
I.1. Terminologie. ..... 5
I.2. Composition et la répartition de l'eau sur le globe terrestre ..... 5
I.2.1. Cycle de l'eau ..... 6
I.2.2. Caractéristiques des eaux souterraines ..... 7
I.3. Paramètres de la qualité des eaux potables ..... 7
I.3.1. Paramètres organoleptiques ..... 7
I.3.1.1 Couleur ..... 7
I. 3.1.2. Odeur ..... 8
I.3.2.Paramètres physico-chimiques ..... 8
I.3.2.1.Température ..... 8
I.3.2.2. Potentiel d'hydrogène ..... 9
I.3.2.3.Turbidité ..... 9
I.3.2.4.Oxygène dissous ..... 9
I.3.2.5. Conductivité électrique ..... 9
I.3.2.6. Solides totaux dissous ..... 10
I.3.2.7. Dureté totale ou titre hydrotimétrique ..... 10

I.3.2.8. Calcium ..... 10
I.3.2.9. Magnésium ..... 10
I.3.2.11. Nitrites ..... 11
I.3.2.12. Phosphates ..... 11
I.3.2.13. Fer ..... 11
I.3.3.Paramètres microbiologiques ..... 11
I.3.3.1.Coliformes fécaux ..... 12
I.3.3.2.Coliformes totaux ..... 12
I.3.3.3.*Escherichia coli* ..... 13
I.3.3.4. Salmonelles ..... 13
I. 3.3.5. *Vibrio cholerae* ..... 13
I.4. Risques sanitaires liés aux bactéries ..... 13
I.5. Normes de la qualité de l'eau destinée à la consommation ..... 14
I.5.1. Normes de la qualité physico-chimique selon OMS ..... 15
I.5.2. Normes de la qualité microbiologique selon OMS ..... 15
**CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES ..... 17**
II.1. Présentation de la zone d'étude ..... 17
II.1.1.Situation géographique et milieu physique de la commune ..... 17
II.1.2. Structure Administrative de la commune ..... 17
II 1.3. Situation économique ..... 19
II.1.4.Approvisionnement en eau potable ..... 20
II.1.4.1.Critères de choix des puits de forages soumis à l'analyse ..... 20
II.1.4.2.Identification et localisation des puits de forage ..... 22
II.1.4.3.Comparaison qualitative des eaux de forage de la Regideso et autres institutions ..... 24
II.2 .Matériel ..... 24
II.3. Méthodes ..... 25
II.3.1. Échantillonnage et moyens de conservation des échantillons ..... 25
II. 3.2. Observation ..... 26
II .3. 3. Analyse des paramètres physico-chimiques *in situ* ..... 26
II .3.4.Analyse des paramètres chimiques ..... 27
II .3.5.Analyse des paramètres microbiologiques ..... 28
III.3.6. Traitement et analyse des données ..... 29

**CHAPITRE.III.PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS ..... 30**
III.1. Paramètres physico-chimiques ..... 30
III.2. Paramètres microbiologiques ..... 39
1. Coliformes totaux ..... 39
2. Coliformes fécaux ..... 40
3. Salmonelles ..... 41
**CONCLUSION ..... 42**
**RECOMMANDATIONS ..... 42**
**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 44**

## SIGLES ET ABREVIATIONS

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétra-Acétique

MEAE : Ministère de l'Environnement, Agriculture et Elevage

MEM : Ministère de l'Energie et Mines

MIELS : Ministère des Infrastructures, de l'Equipement et des Logements Sociaux

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

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PP : Points de prélèvement

RDC : République Démocratique du Congo

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

TDS : Solides totaux dissous

TH : Dureté totale ou titre hydrotimétrique

UFC : Unité Formant Colonie

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1: Nombre des cas de maladies hydriques ..... 3
Tableau 2:Germes recherchés dans les eaux analysées et leur milieu de culture ..... 12
Tableau 3: Bactéries responsables d'infections d'origine hydrique. ..... 14
Tableau 4: Normes des paramètres physico-chimiques ..... 15
Tableau 5: normes des paramètres microbiologiques ..... 16
Tableau 6: Découpage administrative ..... 17
Tableau 7:Répartition des forages en fonction des institutions responsables du forage ..... 22
Tableau 8: Répartition des forages en fonction du système de pompage ..... 22
Tableau 9: Localisation géographique des puits de forage existants en commune Mutimbuzi ..... 23
Tableau 10:Méthodes analytiques pour les analyses physico-chimiques *in situ* ..... 27
Tableau 11:Méthodes analytiques pour les analyses chimiques ..... 28

**LISTE DES FIGURES**

Figure 1: Cycle de l'eau (Assangbe et Avocefohoun, 2018) ..... 6
Figure 2: Localisation géographique de la zone d'étude..... 18
Figure 3:Localisation des forages soumis à l'analyse et non soumis à l'analyse ..... 19
Figure 4:Variation du pH dans les points de prélèvement ..... 30
Figure 5:Variation de la température dans les points de prélèvement ..... 31
Figure 6:Variation de la turbidité dans les points de prélèvement..... 32
Figure 7:Variation de l'oxygène dissous dans les points de prélèvement..... 32
Figure 8:Variation de la conductivité électrique dans les points de prélèvement..... 33
Figure 9:Variation des solides totaux dissous dans les points de prélèvement..... 34
Figure 10:Variation de la concentration des nitrates dans les points de prélèvement..... 34
Figure 11:Variation de la concentration des nitrites dans les points de prélèvement ..... 35
Figure 12:Variation de la concentration des phosphates dans les points de prélèvement..... 36
Figure 13:Variation de la dureté totale dans les points de prélèvement..... 37
Figure 14:Variation de la concentration de calcium dans les points de prélèvement ..... 37
Figure 15:Variation de la concentration de magnésium dans les points de prélèvement..... 38
Figure 16:Variation de la concentration du fer dans les points de prélèvement ..... 39
Figure 17:Variation de la concentration des coliformes totaux ..... 40
Figure 18:Variation de la concentration des coliformes fécaux dans les points de prélèvement ..... 40
Figure 19: Variation de la concentration des salmonelles dans les points de prélèvement ..... 41

## AVANT-PROPOS

Toutes les eaux souterraines sont des ressources en eau nécessaire pour la production de l'eau de consommation, car moins vulnérables aux pollutions que les eaux de surface. Toutefois, certaines caractéristiques minimales sont exigées pour qu'elles puissent être exploitées comme eau potable qui doit, elle-même satisfaire à des normes de qualité physico-chimique et microbiologique. La qualité naturelle de ces eaux souterraines peut être altérée par des activités anthropiques, de mauvaise gestion des déchets, de terrain non viabilisée.

La composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique détermine sa qualité. L'étude des caractéristiques de ces eaux souterraines est souvent destinée à préciser les variations potentielles de leur qualité et à comprendre leur origine (Bakouan et al., 2017).

Le présent travail s'intéresse à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage pour évaluer leur qualité vis-à-vis de la consommation humaine. Ainsi il est utile de connaitre certains paramètres physicochimiques et microbiologiques, qui pourraient être l'origine de plusieurs conséquences négatives. En effet la mauvaise qualité de l'eau de consommation devient un problème de santé publique. C'est dans ce contexte que l'étude sur la qualité de l'eau de ladite commune 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.

## 0. INTRODUCTION GENERALE

Les eaux provenant des nappes souterraines et superficielles sont des ressources exploitées par l'homme pour divers usages (Bakouan et al., 2017). L'eau joue un rôle important dans différents domaines de la vie, la santé, l'accès à l'hygiène (Amaramadi Ahmed, 2013) . L'eau peut contenir des agents pathogènes de nombreuses maladies à transmission hydrique comme la dysenterie amibienne, la fièvre typhoïde, le choléra et les diarrhées sanglantes. Ces maladies sont responsables de la mort des milliers de personnes chaque année à travers le monde surtout en grande majorité les enfants et les vieillards sont plus vulnérable (Meriem et Ouissem, 2017). En plus, toutes les activités menées par la population pour l'alimentation, l'hygiène corporelle, le linge, les vaisselles, l'habitat sont toujours liées à l'eau. La mauvaise qualité de cette eau pour chacun de ses usages a une incidence sur notre santé et peut provoquer plusieurs sortes de maladies cutanées, visuelles, urinaires et intestinales, etc. (Samaké, 2002).

Au niveau mondial, les maladies liées à l'eau sont parmi l'une des plus grandes menaces sur la santé publique. Concernant l'Afrique Sub-saharienne, la qualité de l'eau s'est longtemps focalisée sur la pollution microbiologique de l'eau, car c'est celle qui représente encore aujourd'hui un risque important dans les pays en développement, et plus spécifiquement dans des villes où la croissance spatiale et démographique reste mal contrôlée (Dos Santos, 2018). La pénurie d'eau est devenue un problème crucial vécu par toutes les sociétés en général, et celles des pays en voie de développement en particulier. En effet, l'accroissement des populations et le développement des agglomérations, des unités industrielles et des terres cultivées entrainent par conséquent une dégradation de la qualité des eaux souterraines (Amaramadi Ahmed, 2013).

La pollution de l'eau de boisson d'origine chimique peut entrainer les irritations, les allergies, l'avortement, les cancers et les intoxications chimiques. Par exemples, les nitrates ($NO_3^-$) et leurs précurseurs, les nitrites ($NO_2^-$) sont toxiques pour les êtres vivants, ils transforment l'hémoglobine du sang en une substance proche, la méthémoglobine qui ne joue plus son rôle dans l'oxygénation des cellules et des tissus (El Ouedghiri et al., 2014a). La dose létale de nitrites se situe entre 0,7 g et 6 g (Dana Saleh MD, 2022) et peut provoquer une anémie grave, surtout chez les nourrissons.

Les femmes enceintes qui consomment de l'eau chargée en nitrates peuvent indirectement être à l'origine d'une anémie de l'enfant en cours de développement.

Les nitrites peuvent aussi se combiner au cours de la digestion avec des dérivés de protides en formant des substances soupçonnées d'être cancérigènes : les nitrosamines (El Ouedghiri et al., 2014b).

## 1. Problématique et objectifs

Au Burundi, 59 % seulement de la population s'approvisionnent en eau potable aux sources aménagées, aux bornes fontaines, aux forages et aux puits et 51% de la population s'approvisionnent en eau potable à partir des sources aménagées communément appelées « RUSENGO », à partir des bornes fontaines publiques et dans une faible mesure des puits ; les 49% restants puisent tout naturellement l'eau des rivières et des lacs qui n'est jamais de bonne qualité (USAID Burundi, 2019).

La commune Mutimbuzi est confrontée à une insuffisance en infrastructures hydrauliques liée notamment au manque de sources de captage d'eau aménageables, certains ménages s'approvisionnent encore en eau du Lac Tanganyika. Dans cette commune, la population consomme l'eau provenant de différentes sources comme eau traitée du lac Tanganyika, des puits de forages et des sources de captage. Eau fournie par la Regideso est à 10 %, par des puits de forages à 60% et par des sources de captage à 30%. Elle connait ensuite une carence en infrastructures sanitaires (Mutimbuzi, 2023).

Les données de la population de ladite commune sont celles du recensement général de la population et de l'habitat de 2008 (ISTEBU, 2008). Ces données nous montrent que sa population était de 69525 habitants en 2008. Les projections pour l'année 2023 sont données par une formule $P_n = P_0 (1 + r)^n$ dont le taux de croissance du Burundi est de 2,4% ont été d'une population totale de la commune estimée à 99229 habitants soit une augmentation de 29704 habitants en15 ans. Cette population est répartie sur une superficie de 220 $km^{2.}$

Le tableau1 montre le nombre des cas de maladies hydriques enregistrés depuis l'année 2019 jusqu'en 2022 dans la commune Mutimbuzi (DSNIS Burundi, 2022).

**Tableau 1 : Nombre des cas de maladies hydriques**

| Années | Maladies hydriques | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Fièvre typhoïde | Amibiase | Cholera | Diarrhées sanglantes |
| 2019 | 211 | 60 | 4 | 35 |
| 2020 | 138 | 63 | 6 | 21 |
| 2021 | 73 | 201 | 1 | 15 |
| 2022 | 16 | 614 | 0 | 12 |
| **Total** | **438** | **938** | **11** | **83** |

Source :(DSNIS Burundi, 2022)

Les études antérieures sur la qualité des eaux consommées à Mutimbuzi n'abordent pas la problématique de la qualité de toutes les eaux de consommation. C'est dans ce contexte qu'une étude sur la qualité physicochimique et microbiologique des eaux de forage dans la commune Mutimbuzi est menée en vue de dégager les points forts et faibles et de proposer des pistes de solutions pour limiter des effets liés à la mauvaise qualité de l'eau dans le but de prévenir la population contre les risques sanitaires associés à l'usage de cette eau. Compte tenu de toutes ces considérations nous nous sommes fixés comme :

### 1.1. Objectifs

**Objectif général**: Contribuer à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage dans la commune Mutimbuzi en vue d'améliorer la santé de la population.

**Objectifs spécifiques**

- Identifier et localiser les puits de forage dans la commune Mutimbuzi,
- Déterminer la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forage collectées de ladite commune,
- Comparer la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux utilisées par la population dans ladite commune aux normes de qualité de l'eau potable définies par l'OMS,
- Proposer des pistes de solutions et recommandations aux problèmes identifiés.

## 2. Hypothèse de recherche

L'eau de forage utilisée par la population de la commune Mutimbuzi pourrait contenir des substances chimiques et des bactéries pathogènes qui les rendent impropre pour la consommation humaine.

## 3. Limite de l'étude

Le procédé d'analyse de l'eau pour tous les paramètres connus est compliqué et coûteux. En effet, concernant la détermination de la qualité physico-chimique, la présente étude s'est limitée à l'analyse des paramètres suivants: pH, oxygène dissous, TDS, turbidité, température, conductivité électrique, dureté totale, calcium, magnésium, fer, nitrates, nitrites, phosphates.

Sur le plan microbiologique, le travail s'est limité à la recherche des germes suivants: *Escherichia coli, Vibrio cholerae*, salmonella, coliformes totaux et coliformes fécaux

Elle ne s'est pas intéressée aux métaux lourds (plomb, cadmium, nickel, etc.), ni aux pesticides non pas parce qu'ils ne sont pas importants plutôt par manque de temps et de moyens matériels et financiers.

## 4. Plan du travail

Le présent travail est composé de trois chapitres hormis l'introduction générale. Le premier chapitre traite la revue bibliographique sur les eaux de forage. Ce chapitre s'articule sur la terminologie, cycle de l'eau, les paramètres physico-chimiques et microbiologiques, les maladies hydriques, les directives de l'OMS vis-à-vis de la qualité de l'eau de consommation humaine.

Le deuxième chapitre parle de la méthodologie et matériel utilisé pour atteindre les objectifs. Il est consacré à la description de la zone d'étude et leur localisation géographique, situation d'approvisionnement en eau potable, les critères de choix des forages.

Le troisième chapitre quant à lui présente et discute les résultats obtenus. Enfin la conclusion et les recommandations closent ce travail avant d'aboutir aux références bibliographiques.

# CHAPITRE. I. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES EAUX DE FORAGE

## I.1. Terminologie.

a. L'eau destinée à la consommation humaine est une eau potable qui ne doit contenir en quantité dangereuse, ni de substances chimiques, ni de germes nocifs pour la santé. En outre, elle doit aussi être agréable à boire, autant que les circonstances le permettent. La fraîcheur, l'absence de turbidité, de coloration, de parasites et de goûts ou d'odeurs désagréables sont d'autant de qualités exigées par un approvisionnement public en eau potable (OMS, 2011). Les qualités requises sont donc d'ordre physique, chimique et bactériologique (Amadou et al., 2018).

b. Les eaux souterraines sont des eaux de sous-sol qui constituent une provision d'eau potable inestimable pour l'humanité. En plus des sources, les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources privilégiées pour l'eau potable, car elles sont à l'abri des pollutions que les eaux de surfaces (Meriem et Ouissem, 2017).

c. Le forage est l'action de creuser un trou (aussi appelé « Puits » dans le domaine de la prospection) dans la terre. L'équipement du puits, tel que les tubages, et de manière générale les moyens techniques permettant de creuser, varient en fonction de son dimensionnement et de ses objectifs. On fore pour prospecter et/ou exploiter le sous-sol (Andriamanjato, 2019).

d. Une eau est potable quand elle répond aux critères suivants: fraîche, limpide, inodore, incolore, aérée, légèrement minéralisée, absence de germes nuisibles à la santé et substances toxiques avec goût agréable (Manceur et Djaballah, 2016a).

e. Les maladies hydriques sont des maladies provoquées par l'ingestion ou le contact avec des eaux non potables contenant des vectrices de micro-organismes (bactéries, eucaryotes etc.) qui engendrent des troubles et des pathologies pouvant être mortelles dont le choléra, la dysenterie bacillaire, l'amibiase, la fièvre typhoïde, la poliomyélite, les hépatites A et E font partie des maladies hydriques les plus fréquentes (Ombala, 2013).

## I.2. Composition et la répartition de l'eau sur le globe terrestre

L'eau est la composée minérale la plus répandue à la surface du globe terrestre. Elle constitue l'hydrosphère, son volume est estimé à 1370 millions de $Km^3$, l'eau douce occupe environ 1,5 millions de $Km^3$ répartie entre les fleuves, les lacs et les eaux souterraines.

Les glaces et les calottes polaires représentent 25 millions de $Km^{3.}$ Enfin, il y a 50 000 $Km^3$ sous forme de vapeur et nuages (Assangbe et Avocefohoun, 2018). La réserve mondiale de l'eau est répartie en 5 parties du cycle de l'eau (1) Évaporation et évapotranspiration, (2) Précipitations, (3) Ruissèlement, (4) Infiltration et eau souterraine, (5) Eaux de réservoirs. Ces derniers comprennent les lacs, océans et glaciers. La source principale d'eau douce provient de l'évaporation sous l'effet du soleil, des océans, rivières et des lacs, ainsi que l'évapotranspiration des végétaux (Manceur et Djaballah, 2016).

### I.2.1. Cycle de l'eau

L'eau, élément sous trois formes : liquide à l'état normal, gazeuse en vapeur, solide en glace. L'eau en évaporation lente et incessante des fleuves, des lacs et des mers par condensation, se transforme en pluie. Une partie des eaux de pluie ruisselle à la surface de la terre et va augmenter les cours d'eau et les lacs, d'où elle entraine l'évaporation d'une part et l'autre part l'infiltration à travers le sol. Les eaux d'infiltration sont reprises en partie par la végétation, qu'elles alimentent avant d'être rejetées dans l'atmosphère, et en partie s'accumulent dans le sous sol pour former des nappes souterraines qui, à leur tour, en s'écoulant, donnent naissance aux sources qui émergent à la surface du sol et le cycle continue (Manceur et Djaballah, 2016b).

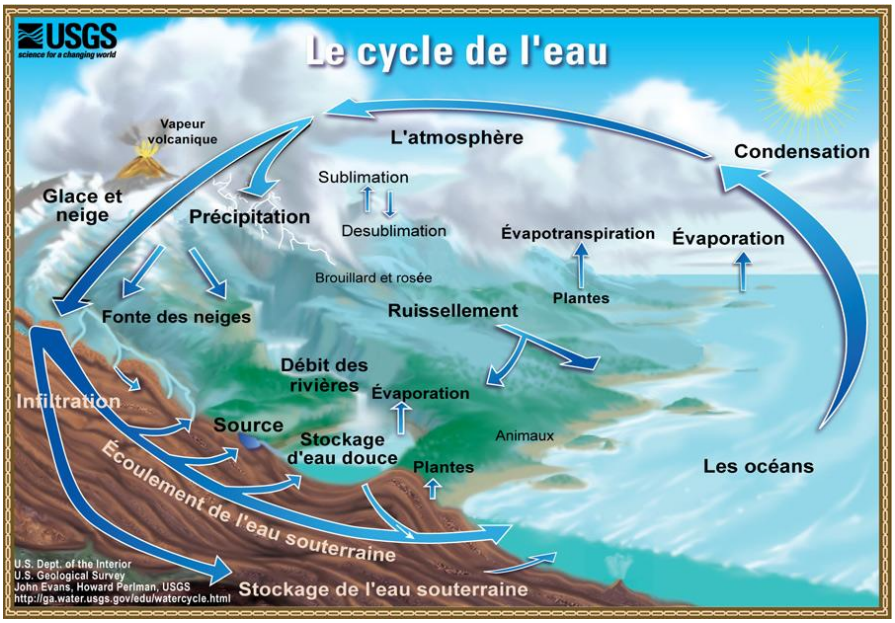



**Figure 1: Cycle de l'eau (Assangbe et Avocefohoun, 2018)**

### I.2.2. Caractéristiques des eaux souterraines

Les eaux potables d'origine souterraines proviennent de deux sources essentielles: les nappes profondes et phréatiques (Manceur et Djaballah, 2016). A l'échelle mondiale, les eaux usées sont la principale source de pollution des ressources en eau souterraine (Dovonou, 2018).

Les eaux de la nappe phréatique qui approvisionnent les eaux de forages sont généralement polluées par (Manceur et Djaballah, 2016a) :

- Le rejet des déchets domestiques, artisanaux et industriels
- L'usage des pesticides et leur rejet sur terre ou dans les puisards sans traitement.
- Le rejet des eaux de lavage contenant des produits tels que la soude caustique et d'autres produits.
- Le non-respect de la distance de sécurité entre forages et latrines dans les conceptions, la propagation des bactéries à partir des latrines, des fosses de filtration ou par les activités menées autour des forages. La pollution microbiologique de la nappe phréatique à partir d'une latrine entraine la multiplication des germes pathogènes ainsi que leur migration dans le sol. Ces deux phénomènes dépendent de nombreux facteurs abiotiques (climat, nature du sol) et biotiques (nature des micro-organismes). La surface d'une nappe souterraine, connue sous le nom de surface libre, est sujette à des fluctuations de niveau (Manceur et Djaballah, 2016b).

## I.3. Paramètres de la qualité des eaux potables

La qualité des eaux est caractérisée par des paramètres organoleptiques, physico-chimiques et microbiologiques.

### I.3.1. Paramètres organoleptiques

#### I.3.1.1 Couleur

La couleur de l'eau peut être entrainé par la présence des minéraux naturels comme le fer le manganèse mais aussi à la présence de planctons, d'herbages et de composés organiques comme les substances humiques et les polyphénols. C'est un paramètre qui traduit une nuisance d'ordre esthétique, la coloration des eaux peut avoir une origine naturelle, industrielle, chimique ou biologique (Djebbar et Chitti, 2021).

**I. 3.1.2. Odeur**

Les eaux peuvent être polluées et chargées en matières organiques particulaires et en décomposition (OMS, 2011). L'odeur d'une eau montre un signe de pollution ou de la présence de matières organiques en décomposition en quantité souvent si minime qu'elles ne peuvent être mises en évidence par les méthodes d'analyse. Le sens olfactif peut seul, dans une certaine mesure, les déceler (Manceur et Djaballah, 2016a).

Une eau destinée à la consommation doit être inodore non seulement au moment du prélèvement mais aussi et surtout après quelques temps de conservation dans un vase ou récipient clos à température ambiante (Bidon, 2020).

**I.3.2.Paramètres physico-chimiques**

L'analyse et le suivi de la qualité physico-chimique de l'eau destinée à la consommation sont indispensables dans le but de s'assurer que leurs concentrations ne dépassent pas les normes de la qualité des eaux potables recommandées par l'OMS pour éviter des effets négatifs pour notre santé. Les paramètres les plus couramment suivi lors des contrôles de qualité physico-chimiques comprennent : la turbidité, le pH, la température, la conductivité (Meriem et Ouissem, 2017).

**I.3.2.1.Température**

La température est un paramètre le plus important pour une eau de boisson car il permet d'indiquer la clarté et le goût de l'eau. Celle-ci varie en fonction des saisons, de la profondeur de l'eau et influe sensiblement sur les constantes d'équilibre (Haoussa, 2013).

La température d'une eau potable peut être inférieure en saison sèche et supérieure en saison de pluie à la température de l'atmosphère. Pour que l'eau potable soit désaltérante, sa température doit être variée entre 8 et 15°C pendant la saison de pluie et entre 20 et 25 °C en saison sèche. L'OMS ne recommande aucune valeur vu que la température d'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé humaine. En revanche, une température supérieure à 15 °C favorise l'accroissement des micro-organismes d'une part et d'autre part peut intensifier les odeurs et les saveurs. Par contre une température inférieure à 10$^{o}$C ralentie les réactions chimiques dans les différents traitements d'eaux.

Il est important de connaître avec précision la température d'une eau car elle joue un rôle dans la solubilité des sels, des gaz, dans la dissociation des sels dissous, sur la conductibilité électrique et le pH (Meriem et Ouissem, 2017).

### I.3.2.2. Potentiel d'hydrogène

Le pH des eaux destinées à la consommation est un paramètre très utile parce qu'il agit sur le goût et l'efficacité des procédés de traitement (coloration, coagulation, floculation ...etc.) et sur les phénomènes de corrosion, agressivité et entartrage des canalisations (Haoussa, 2013). 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, le pH=7 montre la neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples. Il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau. Dans les eaux naturelles, les valeurs du potentiel Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 (Kaboré et al., 2020).

### I.3.2.3.Turbidité

La turbidité montre la concentration d'une eau en particules suspendues comme débris organiques, argiles, organismes microscopiques, qui la rende trouble. Il est essentiel de connaître la turbidité pendant le traitement de l'eau parce qu'elle favorise la croissance des microorganismes indicateurs de contamination, diminue l'efficacité des désinfectants et développe la consommation de chlore tout en diminuant son efficacité (Andriamanjato, 2019).

### I.3.2.4.Oxygène dissous

La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de plusieurs facteurs, en récurrence la température, la salinité et la pression atmosphérique. Il est en fonction de l'origine de l'eau. Les eaux superficielles peuvent en contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation. Les eaux profondes n'en contiennent le plus souvent que quelques milligrammes par litre (Ayad et Kahoul, 2016).

### I.3.2.5. Conductivité électrique

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes, la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés d'électrons. Elle s'exprime en micro siemens par centimètre. La mesure de la conductivité permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité varie en fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente (Aggoune Kouds, 2019).

### I.3.2.6. Solides totaux dissous

Les TDS rendent compte de la concentration des substances minérales dans l'eau. La teneur des TDS dans l'eau varie considérablement dans différentes régions géologiques à cause de la différence de solubilité des minéraux (Meriem et Ouissem, 2017)

### I.3.2.7. Dureté totale ou titre hydrotimétrique

La dureté de l'eau est appliquée pour bien décrire la concentration en calcium et en magnésium des eaux de consommation donc la dureté totale est la teneur totale en calcium et magnésium exprimée en mg/L (Marchal et Rabier, 2011).

### I.3.2.8. Calcium

Le calcium est l'élément principal de la dureté de l'eau, il est un métal alcalino-terreux qui se manifeste le plus souvent dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonate. Leur concentration dans l'eau est directement liée à la nature géologique des terrains traversés, obtenus en majorité lors de l'attaque des roches calcaires par l'anhydride carbonique dissous ($CO_2$). Ces sels se rencontrent dans presque toutes les eaux naturelles (Haoussa, 2013).

### I.3.2.9. Magnésium

Le magnésium provient de l'attaque par l'acide carbonique des roches magnésiennes et de la mise en solution du magnésium sous forme de carbonates et bicarbonates. La majorité des eaux naturelles contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa concentration dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (Nouayti et al., 2015).

I.3.2.10. Nitrates

Les nitrates constituent la forme azotée dominante dans les cours d'eau et dans les nappes d'eau souterraines. Ils proviennent généralement de la décomposition de la matière organique par oxydation bactérienne des nitrites et constituent ainsi l'ultime produit de la nitrification (El Ouedghiri et al., 2014a).

### I.3.2.11. Nitrites

Les nitrites peuvent être rencontrés dans les eaux souterraines, mais généralement à des doses faibles, une eau qui renferme des nitrites peut être considérée comme suspecte. Une teneur d'azote nitreux supérieure à 0,10mg/L suppose un apport d'eaux riches en matières organiques en voie d'oxydation. Cette concentration de 0,10mg/L ne devrait pas être dépassée dans une eau d'origine profonde. Il est important de signaler que les eaux en contact avec certains terrains peuvent contenir des nitrites. On les trouve également dans les eaux pauvres en oxygène (El Ouedghiri et al., 2014a).

### I.3.2.12. Phosphates

Les ions phosphates dans les nappes phréatiques peuvent être d'origine naturelle : décomposition de la matière organique; lessivage des minéraux, ou due aussi aux rejets industriels , domestiques et engrais (Aggoune et Kouds, 2019).

Les phosphates sont généralement responsables de l'accélération du phénomène d' eutrophisation dans les lacs ou les rivières, s'ils dépassent les normes, ceux-ci sont considérés comme indice de contamination fécale en entrainant une prolifération des germes, goût et coloration (Meriem et Ouissem, 2017).

### I.3.2.13. Fer

La présence du fer dans l'eau dépend des conditions physiques et hydrologiques. Il se retrouve le plus souvent dans les eaux souterraines parce que c'est un élément de la croûte terrestre à raison de 4,5 à 5%. Dans les terrains de faible perméabilité ou ceux situés dans les couches imperméables, ces eaux contenant moins d'oxygène se chargent en fer. La mise en solution du fer est causée par l'activité microbienne du sol qui nécessite des conditions de pH et de potentiel de l'oxydo- réduction particulières (Haoussa, 2013).

### I.3.3.Paramètres microbiologiques

La présence de micro-organismes dans les eaux de boisson est le plus fréquemment due à une dégradation de la qualité des ressources en eau, à une mauvaise protection ou un manque d'entretien des ouvrages de captage. La présence des micro-organismes dans l'eau de consommation peut provoquer des maladies hydriques comme la fièvre typhoïde, cholera, dysenterie bacillaire et la dysenterie amibienne (Bidon, 2020).

Le tableau ci-dessous montre les bactéries recherchées, les milieux de cultures à utiliser pour les isoler ainsi que la température et temps d'incubation.

**Tableau 2:Germes recherchés dans les eaux analysées et leur milieu de culture**

| Germes recherchés | Milieux de culture | Température/Temps d'incubation |
|---|---|---|
| Germes fécaux | PCA | $37^0$c/24h |
| Coliformes totaux | VRBL | $30^0$c/24h |
| Salmonelles | PCA | $44^0$c/24h |
| *Escherichia coli* | TBX | $44^0$c/24h |
| *Vibrio cholerae* | TCBS | $37^0$c/24h |

Source: Soncy et al. (2019)

PCA : Plate count Agar, VRBL: Gélose au Cristal Violet au Rouge Neutre à la bile et au Lactose. TCBS: Thiosulfate citrate bile saccharose

### I.3.3.1.Coliformes fécaux

Ce sont des coliformes qui présentent les mêmes propriétés et caractéristiques des coliformes totaux après incubation à la température de 44°C (Khichane et Khouas, 2019).

### I.3.3.2.Coliformes totaux

Ils regroupent un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant à la famille des Enterobacteriaceae (Hounzinme et Adandedia, 2017). Les coliformes totaux sont des bactéries en bâtonnets, non sporogènes, Gram négatifs, oxydase négatifs, facultativement anaérobies. Ils sont capables de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaires, et capables de fermenter le lactose (et le mannitol) avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 heures, à des températures de 35 à 37 °C (Djebbar et Chitti, 2021).

### I.3.3.3.*Escherichia coli*

Ce sont des bactéries d'origines fécales que l'on retrouve dans le tube digestif des humains et des animaux. Ces bactéries peuvent transmettre diverses maladies; dont la plus fréquente es la gastro-entérite. Habituellement sans gravité, toutefois, elle peut avoir de graves conséquences sur la santé pour les enfants, les personnes âgées et les personnes dont le système immunitaire est affaibli (Hounzinme et al., 2017).

Les *Escherichia coli* sont des bactéries qui produisent de l'indole à partir du tryptophane, ils sont méthyl +, acetoïne -, citrate-, KCN- et possèdent un glutamate décarboxylase. Les *Escherichia coli* possèdent l'enzyme β-D glucuronidase; l'activité de cette enzyme est considérée comme spécifique et la détection de celle-ci est utilisée dans certaines méthodes d'énumération des *E. coli* (Garcia-Armisen, 2006).

### I.3.3.4. Salmonelles

Il existe plusieurs espèces de salmonelles dont la classification a été modifiée de nombreuses fois et qui n'est toujours pas bien stabilisée. Leur transmission se fait par voie oro-fécale. La salmonellose est ainsi une maladie d'origine hydrique.

Les sérotypes typhi, paratyphi A, B et C sont responsables des salmonelloses humaines les plus graves, parfois mortelles (Amaramadi Ahmed, 2013).

### I. 3.3.5. *Vibrio cholerae*

Le *Vibrio cholerae*, agent du choléra, appartenant aux sérogroupes O1 et O139 de l'espèce *Vibrio cholerae*. Certaines souches appartenant aux autres sérogroupes, appelées *V. cholerae* non-O1/non-O139, également pathogènes pour l'homme, sont à l'origine de gastro-entérites, de lésions cutanées, d'otites et plus rarement de septicémies dont l'évolution peut être fatale chez les sujets immunodéprimés. On l'isole à partir d'un milieu appelé TCBS (Robert-Pillot et al., 2006).

## I.4. Risques sanitaires liés aux bactéries

Les bactéries sont des êtres vivants unicellulaires simples et sans noyau, douées de métabolisme et capables de croitre et se diviser aux dépens de substances nutritives. Elles sont responsables de certaines maladies (Djebbar et Chitti, 2021).

Les principales bactéries responsables d'infections d'origine hydrique sont résumées dans le tableau 3.

**Tableau 3: Bactéries responsables d'infections d'origine hydrique.**

| Bactéries | Maladies induites | Mode de contamination |
|---|---|---|
| *Escherichia coli* | Gastro-entérite | Par voie orale |
| *Salmonella typhi* et paratyphi A | Fièvre typhoïde | Par voie orale |
| *Vibrio cholerae* | Choléra | Par voie orale |
| *Entamoeba histolytica histolytica* | Dysenterie amibienne | Par voie orale |
| *Shigella shiga* | Dysenterie bactérienne | Par voie orale |
| *Pseudomonas aeruginosa* | Infection cutanée | Par voie orale et cutanée |
| *Staphylococcus aureus* | Infection cutanée | par voie cutanée |

**Source :** Djebbar et Chitti (2021).

## I.5. Normes de la qualité de l'eau destinée à la consommation

Les normes fondamentales destinées à garantir la sécurité sanitaire de l'eau de consommation constituent un cadre, qui comprend des objectifs sanitaires établis par une autorité compétente dans le domaine de la santé, des systèmes adaptés et convenablement gérés ainsi qu'un système de surveillance indépendant (Maoudo et Diane, 2020).

Les exigences à respecter diffèrent selon l'utilisation de l'eau. En effet, les normes requises pour une eau d'irrigation ne seront pas les mêmes que celles exigées pour une eau souterraine à consommer. C'est pourquoi l'OMS propose la norme de potabilité pour l'eau de consommation (Andriamanjato, 2019). Les directives de l'OMS concernant la qualité des eaux de boisson ont été développées pour protéger la santé publique (OMS, 2011).

### I.5.1. Normes de la qualité physico-chimique selon OMS

Pour vérifier la qualité de l'eau potable que nous consommons, différents paramètres physiques et chimiques entrent en jeu. Ils contrôlent et définissent le niveau de potabilité en se basant sur les valeurs limites à ne pas dépasser. Si toutes les conditions et les seuils correspondent à la normale, alors l'eau se déclare potable, consommable et sans risque pour la santé (OMS, 2006). Le tableau ci-dessous montre la variation des normes de quelques paramètres physico-chimiques

**Tableau 4: Normes des paramètres physico-chimiques**

| Paramètres | Unité | Normes | Source |
|---|---|---|---|
| Température | $^0$C | <25 | (OMS, 2003) |
| Oxygène dissous | mg/l | ≥ 3 | (OMS, 2006) |
| Potentiel d'hydrogène | - | 6 ,5- 9 | (OMS, 2011) |
| Conductivité électrique à 20$^0$C | µS/cm | <1100 | (OMS, 2011) |
| Turbidité | NTU | <5 | (OMS, 2011) |
| TDS | mg/l | <600 | (OMS, 2011) |
| Dureté totale | mg/l | 100-300 | (OMS, 2011) |
| Calcium | mg/l | <100 | (OMS, 2011) |
| Magnésium | mg/l | <50 | (OMS, 2003) |
| Fer | mg/l | 0,3 | (OMS, 2007) |
| Nitrates | mg/l | <50 | (OMS, 2006) |
| Nitrites | mg/l | <0,2 | (OMS, 2006) |
| Phosphates | mg/l | <0,2 | (OMS, 2003) |

### I.5.2. Normes de la qualité microbiologique selon OMS

La qualité microbiologique de l'eau consiste au dénombrement des coliformes et des germes pathogènes (Traoré et Kone, 2020). L'eau destinée à la consommation et aux besoins ménagers ne doit pas contenir des microorganismes pathogènes (Bidon, 2020). Pour les paramètres microbiologiques sur lesquels portent la présente étude, les normes de qualité admises à l'échelle internationale sont présentées dans le tableau 5.

**Tableau 5: Normes des paramètres microbiologiques**

| Paramètres | Unité | Directives selon OMS |
|---|---|---|
| *Vibrio cholerae* | UFC/100mL | 0 |
| *Salmonella typhi* | UFC/100mL | 0 |
| *Shigella dysenteriae* | UFC/100mL | 0 |
| Coliformes fécaux | UFC/100mL | 0 |
| Coliformes totaux | UFC/100mL | 0 |
| *Escherichia coli* | UFC/100mL | 0 |
| *Staphylococcus aureus* | UFC/100mL | 0 |
| *Pseudomonas aeruginosa* | UFC/100mL | 0 |

# CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

## II.1. Présentation de la zone d'étude

### II.1.1.Situation géographique et milieu physique de la commune

La commune Mutimbuzi est parmi les neufs communes de la province Bujumbura Rural. Elle est limitée:

- Au Sud par la Mairie de Bujumbura et le lac Tanganyika;
- A l'Ouest par RDC;
- Au Nord par les communes Gihanga et Mpanda de la province Bubanza;
- A l'Est par les communes Mubimbi, Isale de la province Bujumbura et Rugazi de la province Bubanza.

La commune Mutimbuzi appartient aux régions naturelles de « MIRWA »et« IMBO » avec les parallèles 2º57'et 4º28' Sud et Méridiens 28 º 59' et 29 º 44' Est pour la région IMBO et 2º 36'et 4º14' Sud et 29 º 03' et 29 º 43' Est pour la Région MIRWA. Elle s'étend sur une aire de 220 $km^2$ avec 33 collines de recensement, l'altitude varie entre 775 m à 1100 m et la commune est traversée par les rivières Gikoma, Muzazi, Murago et Mutimbuzi (République du Burundi, 2023).

### II.1.2. Structure Administrative de la commune

La commune Mutimbuzi est subdivisée en 4 zones avec 33 collines de recensement. Il ressort de ce tableau que la zone Maramvya a plusieurs collines par rapport aux autres zones.

**Tableau 6: Découpage administrative**

| ZONES | Nombre de collines |
|---|---|
| Gatumba | 9 |
| Rubirizi | 8 |
| Rukaramu | 5 |
| Maramvya | 11 |
| **TOTAL** | **33** |

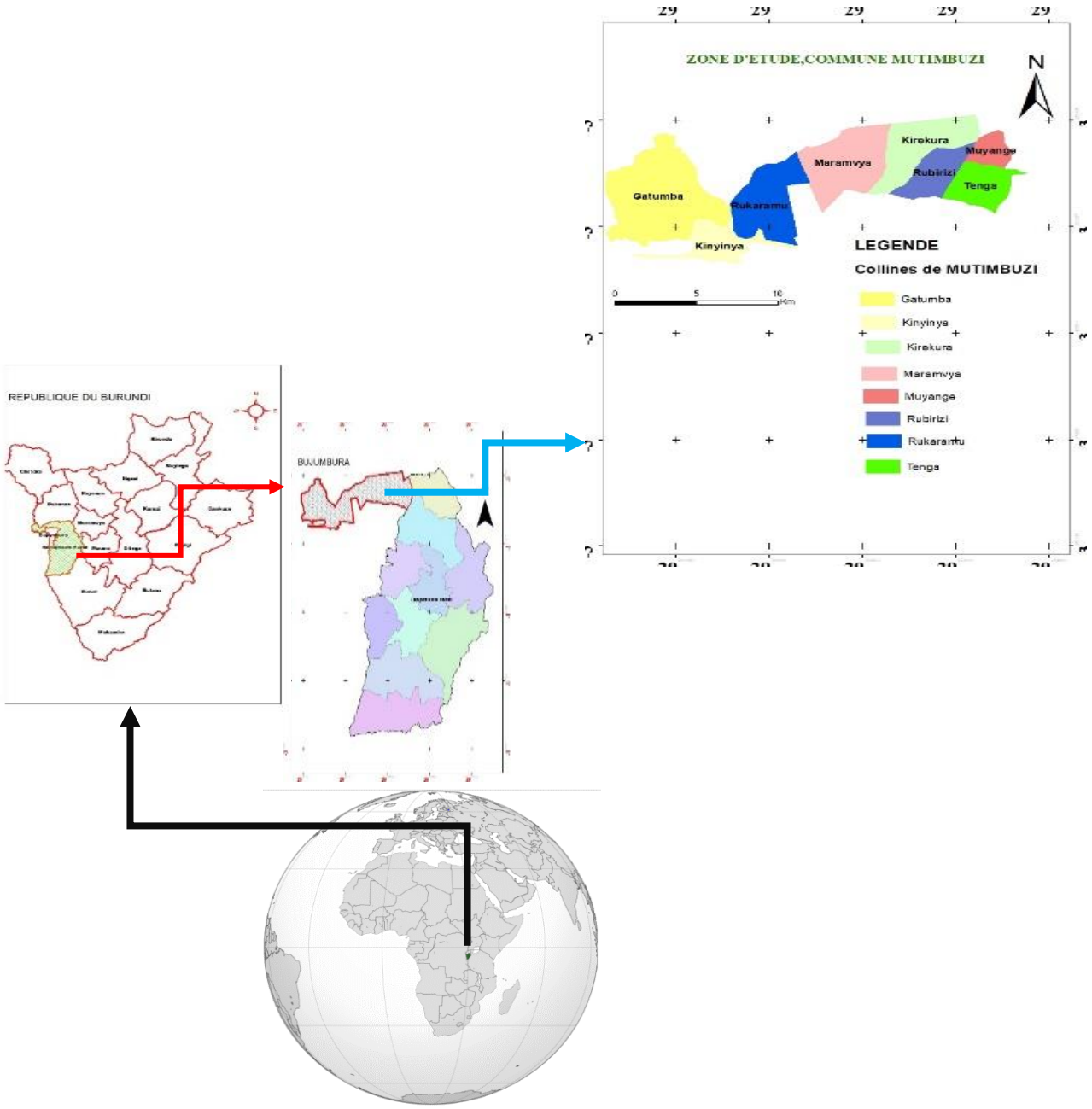



**Figure 2: Localisation géographique de la zone d'étude**

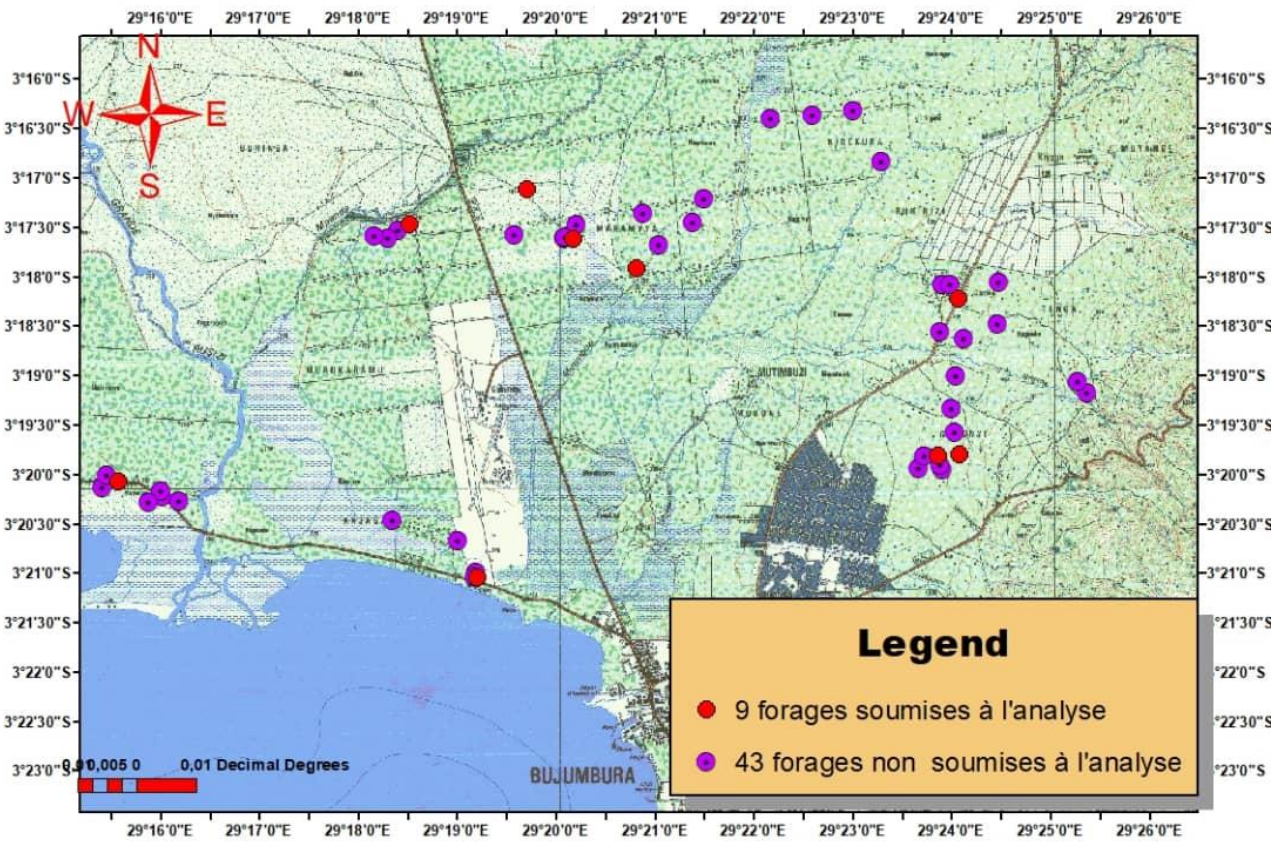



**Figure 3:Localisation des forages soumis à l'analyse et non soumis à l'analyse**

### II 1.3. Situation économique

L'économie de la commune Mutimbuzi repose principalement sur l'agriculture et l'élevage. La commune enregistre en son sein des plaines avec un sol très productif car composé par des alluvions provenant des montagnes. Les champs sont subdivisés en petites superficies de 40-50 ares. La main d'œuvre demeure familiale ce qui provoque de faibles revenus pour subvenir aux besoins. L'agrandissement de la ville de Bujumbura exerce une forte pression sur les terres cultivables qui s'amenuisent progressivement. La production est aussi limitée par l'insuffisance d'intrants agricoles aussi bien pour les semences sélectionnées que les fertilisants. Les principales cultures vivrières cultivées dans la commune sont notamment le riz, le maïs, le haricot, le manioc, la patate douce, le bananier et les arachides. D'autres cultures considérées comme secondaires et qui sont exploitées à faible échelle dans cette commune sont le sorgho et les colocases. En général, la production pour toutes ces cultures vivrières est satisfaisante parce que la Commune dispose d'un sol fertile. L'élevage est composé essentiellement l'élevage par stabulation permanente en nombre important.

La grande majorité des animaux présents dans la commune sont les bovins, les caprins, les volailles, rares sont les ovins. Parallèlement à l'agri-élevage, la principale ressource des recettes de la commune provient du secteur du commerce. Le secteur artisanal dans le commun mérite aussi une attention particulière vue les ménages qu'il fait vivre (Mutimbuzi, 2023)

### II.1.4.Approvisionnement en eau potable

L'approvisionnement en eau pour les usages par l'homme se fait essentiellement de l'eau de surface et l'eau souterraine. Concernant l'approvisionnement en eau potable, la commune Mutimbuzi dispose à peu près trois sortes d'ouvrages: eau de forages, eau de sources (Amazi ya rusengo), et eau traité du lac Tanganyika (eau du réseau). La majorité de la population utilise le plus souvent l'eau de forages pour la consommation, la cuisson, lavages des assiettes, lessives, hygiène corporelle, hygiène pour toilettes etc (Mutimbuzi, 2023). Les forages de la commune ont été préférés de façon à savoir l'image de l'ensemble de la qualité microbiologique et physico-chimique de l'eau de forages dans la plaine de l'Imbo.

#### II.1.4.1.Critères de choix des puits de forages soumis à l'analyse

Les critères du choix des forages ont été basés sur l'effectif de la population desservie par les points d'eaux choisis et sur des forages proches des rivières et marécages agricoles d'où le choix de neuf forages parmi les 52 puits de forages identifiés dans ladite commune enfin d'avoir un échantillon représentatif.

**Photos montrant les puits de forages soumis à l'analyse**



**Forage 1**



**Forage 2**



**Forage 3**



**Forage 4**



**Forage 5**



**Forage 6**



**Forage 7**



**Forage 8**



**Forage 9**

### II.1.4.2.Identification et localisation des puits de forage

La commune Mutimbuzi compte 52 puits de forages d'eau. Ces forages ont été construits par différentes institutions dont la Regideso, le projet Amazi water, la communauté musulmane, The Burundi assemblies of God et les privés. Parmi ces puits de forages, il y a ceux qui refoulent l'eau par pompage manuel, d'autres par pompage électrique et d'autres encore par pompage solaire. Pour identifier ces forages, des visites et des observations ont faites sur terrain. Le GPS a permis la prise des coordonnées géographiques pour chaque forage identifié. Les 3 tableaux ci-dessous montrent respectivement la répartition de ces puits de forage, leur répartition en fonction du système de pompage et leur localisation géographique.

**Tableau 7:Répartition des forages en fonction des institutions responsables**

| | Les institutions responsables | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Regideso | Amazi water | Communauté Musulmane | Burundi assemblies of God | Privé | |
| Collines | | | | | | TOTAL |
| Gatumba | 4 | 3 | 3 | | | 1O |
| Rubirizi | | | 10 | | 2 | 12 |
| Maramvya | | 9 | 3 | | | 12 |
| Rukaramu | | 1 | 4 | | | 5 |
| Kirekura | | 4 | | | | 4 |
| Kinyinya | | 1 | | | | 1 |
| Tenga | | | 3 | 1 | 2 | 6 |
| Muyange | | 2 | | | | 2 |
| TOTAL | 4 | 20 | 23 | 1 | 4 | **52** |

**Tableau 8: Répartition des forages en fonction du système de pompage**

| **Types de forages** | **Nombres** | **%** |
|---|---|---|
| Forages à pompe manuel | 45 | 86,5 |
| Forages à pompe électrique | 5 | 9,7 |
| Forages à pompe Solaire | 2 | 3,8 |
| TOTAL | 52 | **100** |

**Tableau 9: Localisation géographique des puits de forage existants en commune Mutimbuzi**

| PP | Zones | Collines | Profondeur (mètre) | Longitude (Est) | Latitude (Sud) | Altitude (mètre) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F1* | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,330252 | 29,39758 | 787 |
| F2* | Rubirizi | Gahahe | 20 | 3,330022 | 29,401361 | 789 |
| F3* | Rubirizi | Tenga | 40 | 3,303802 | 29,401086 | 784 |
| F4* | Maramvya | Samariro | 20 | 3,293711 | 29,33613 | 785 |
| F5* | Maramvya | 13ème Av | 20 | 3,298594 | 29,346805 | 786 |
| F6* | Maramvya | 14ème Av | 20 | 3,285288 | 29,328443 | 785 |
| F7* | Rukaramu | Rukaramu | 20 | 3,291163 | 29,308644 | 786 |
| F8* | Gatumba | Kajaga | 60 | 3,350625 | 29,319968 | 787 |
| F9* | Gatumba | Ruzizi | 60 | 3,334599 | 29,259491 | 784 |
| F10 | Gatumba | Kinyinya 1 | 20 | 3,349816 | 29,319913 | 787 |
| F11 | Gatumba | Kinyinya2 | 20 | 3,350583 | 29,31955 | 789 |
| F12 | Gatumba | Mushasha1 | 40 | 3,337738 | 29,269733 | 784 |
| F13 | Gatumba | Mushasha1 | 20 | 3,337049 | 29,266849 | 785 |
| F14 | Gatumba | Mushasha2 | 20 | 3,336072 | 29,266755 | 786 |
| F15 | Gatumba | Mushasha2 | 20 | 3,337911 | 29,650944 | 785 |
| F16 | Gatumba | Gaharawe | 20 | 3,337933 | 29,264705 | 786 |
| F17 | Gatumba | Gaharawe | 20 | 3,335477 | 29,256772 | 787 |
| F18 | Gatumba | Gaharawe | 20 | 3,333486 | 29,257705 | 784 |
| F19 | Gatumba | Vugizo | 20 | 3,341038 | 29,305747 | 783 |
| F20 | Maramvya | 14ème Av | 20 | 3,286749 | 29,358241 | 782 |
| F21 | Maramvya | 14ème Av | 20 | 3,290847 | 29,356433 | 784 |
| F22 | Maramvya | 15ème Av | 20 | 3,294561 | 29,350702 | 785 |
| F23 | Maramvya | 15ème Av | 20 | 3,289269 | 29,34791 | 788 |
| F24 | Maramvya | 13ème Av | 20 | 3,292322 | 29343430 | 786 |
| F25 | Maramvya | Kinyinya | 20 | 3,293419 | 29,334736 | 787 |
| F26 | Maramvya | Kirekura | 20 | 3,292847 | 29,326269 | 783 |
| F27 | Maramvya | Kirekura | 20 | 3,293233 | 29,334869 | 786 |
| F28 | Maramvya | Kirekura | 20 | 3,291236 | 29,336777 | 785 |
| F29 | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,309313 | 29,398005 | 786 |
| F30 | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,305262 | 29,398469 | 785 |
| F31 | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,30123 | 29,399713 | 786 |
| F32 | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,326108 | 29,400502 | 787 |
| F33 | Rubirizi | Gatunguru | 20 | 3,322077 | 29,399966 | 788 |
| F34 | Rubirizi | Gahahe | 20 | 3,316625 | 29,400744 | 789 |
| F35 | Rubirizi | Gahahe | 20 | 3,332469 | 29,398361 | 785 |

| PP | Zones | Collines | Profondeur | Longitude | Latitude | Altitude |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F36 | Rubirizi | Gahahe | 20 | 3,331655 | 29,39798 | 786 |
| F37 | Rubirizi | Gahahe | 20 | 3,332177 | 29,394475 | 787 |
| F38 | Rubirizi | Gahahe | 35 | 3,330166 | 29,39529 | 785 |
| F39 | Rubirizi | Tenga Local | 20 | 3,307969 | 29,407708 | 789 |
| F40 | Rubirizi | Tenga Local | 20 | 3,310383 | 29,401941 | 788 |
| F41 | Rubirizi | Tenga Local | 20 | 3,300936 | 29,407983 | 786 |
| F42 | Rubirizi | Tenga Local | 20 | 3,319505 | 29,422836 | 787 |
| F43 | Rubirizi | Tenga Nombe | 20 | 3,317672 | 29,421236 | 789 |
| F44 | Rubirizi | Tenga Nombe | 20 | 3,272011 | 29,383308 | 788 |
| F45 | Rubirizi | Tenga Nombe | 20 | 3,272633 | 29,376583 | 789 |
| F46 | Rubirizi | Nyabunyegeri | 20 | 3,27333 | 29,369538 | 786 |
| F47 | Rubirizi | Nyabunyegeri | 20 | 3,280425 | 29,388202 | 787 |
| F48 | Rukaramu | Muyange1 | 20 | 3,292172 | 29,306627 | 782 |
| F49 | Rukaramu | Muyange2 | 20 | 3,293511 | 29,304952 | 783 |
| F50 | Rukaramu | Kigaramango | 20 | 3,293091 | 29,302805 | 781 |
| F51 | Rukaramu | Kinyinya | 20 | 3,344505 | 29,316794 | 782 |
| F52 | Rukaramu | Rukaramu | 20 | 3,307969 | 29,407708 | 781 |

PP : Point de prélèvement * : sites d'étude

### II.1.4.3.Comparaison qualitative des eaux de forage de la Regideso et autres institutions

La vision de la Direction de l'Eau de la Regideso est d'assurer en permanence l'alimentation en eau potable de manière durable aux populations urbaines et rurales. Elle a pour missions d'augmenter et maitriser la quantité d'eau potable, maintenir la qualité de l'eau, étendre le réseau de distribution et entretenir les ouvrages hydrauliques. La commune Mutimbuzi a 4 forages aménagés par la Regideso et 48 forages non contrôlés par la Regideso. Nous avons également intéressé de réaliser une analyse physico-chimique et microbiologique dans le but d'établir la comparaison entre l'eau de forage distribuée par la Regideso et les autres institutions responsables du forage.

## II.2 .Matériel

- Un stylo
- Un carnet de terrain
- Des flacons en propylène stériles et polyéthylène non stériles pour contenir les échantillons d'eau à analyser
- Les échantillons d'eau de différents forages

- Un GPS pour relever des coordonnées géographiques concernant la zone d'étude
- Bac à glaçon pour transporter les échantillons d'eau
- Une multisonde consort 6010 pour la mesure de la conductivité électrique, de la température de l'eau, des solides totaux dissous et du potentiel d'hydrogène. Ces paramètres se mesurent sur terrain
- Un turbidimètre HI88703 de mark HANNA pour mesurer la turbidité
- Une balance
- Boites de Pétri et des flacons en plastiques ou en verres
- Flacons de dilution de 160ml en verre borosilicaté avec bouchon en caoutchouc
- Pipettes stériles de 1ml, 5ml, 10ml, graduées en unité de 0,1ml
- Bain marie thermostat à $55\pm1^0$C pour chauffer la gélose
- Pompe aspirante
- Robinet d'eau
- Bec bunsen
- Pincettes, Ciseaux, pipettes, Embouts, Pinces
- Briquet ou allumette
- Gaz butane
- Incubateur réglable : un à $360^0$C et un autre à $440^0$C
- Produits chimiques
- Milieux de cultures et divers
- Autoclave pour stérilisation à $121^0$C

## II.3. Méthodes

### II.3.1. Échantillonnage et moyens de conservation des échantillons

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué 3 prélèvements d'eau destinée à l'analyse physico-chimique et microbiologique, le premier prélèvement a été effectué le 8 novembre 2023, le deuxième prélèvement le 13 décembre 2023 et le 3ème prélèvement le 7 février 2024. L'ensemble des prélèvements a été réalisé à partir dans la même commune et pendant une période allant du 8 novembre 2023 au 7 mars 2024. Les échantillons destinés à une analyse microbiologique ont été prélevés dans des flacons en verre de 250 ml stérilisés à sec préalablement à une température de $120^0$C et pendant 20min. Le flacon déjà stérilisé a été rempli au $9/10^{ème}$ et reboucher disons pas entièrement.

Tandis que pour les échantillons destinés à des analyses physico-chimiques, le prélèvement a été effectué dans des flacons en P.E.T (Poly éthylène) d'une capacité de 1,5 L bien nettoyés. Ces derniers ont été entièrement remplis tout évitant l'entrée des bulles d'air. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C jusqu'au Laboratoire. Cette étude a été réalisée dans deux laboratoires différents, l'un au niveau de laboratoire de chimie et d'analyse environnemental au sein de l'Université du Burundi et l'autre au niveau de Laboratoire de Regideso dans le service production eau.

### II. 3.2. Observation

Avant d'identifier le choix du point de prélèvement, l' analyse de la situation environnante des forages par observation du nombre de ménages tout autour, la pratique agricole et les rivières passant tout près des forages a été faite.

### II .3. 3. Analyse des paramètres physico-chimiques *in situ*

Pour des paramètres physico-chimiques *in situ*, les 6 éléments ont été analysées il s'agit de : pH, turbidité, TDS, conductivité électrique, oxygène dissous et température. Le pH, la température, la conductivité électrique et les solides totaux dissous (TDS) ont été analysés *in situ* à l'aide d'une multisonde consort de marque HACH en immergeant la sonde spécifique pour chaque paramètre, agiter puis passer la lecture sur l'écran de l'appareil dès que la valeur devient stable. La sonde est rincée avec de l'eau distillée et essuyée délicatement avec papier après chaque mesure. L'appareil affiche la valeur mesurée en µS/cm pour la conductivité électrique, en °C pour la température, en mg/L pour les solides totaux dissous. En fin, l'oxygène dissous a été mesurée à l'aide de la méthode volumétrique de Winkler modifiée par Alsterberg.

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre de marque HI88703 en insérant la cuvette remplie de l'échantillon à 2/3 dans l'appareil tout en respectant la direction du train tracé sur le turbidimètre, après avoir mis cette cuvette, appuyer sur le bouton READ et l'appareil affiche la valeur qui est mesurée en NTU. Le tableau ci-dessous montre les méthodes analytiques pour les analyses physico-chimiques in situ.

**Tableau 10:Méthodes analytiques pour les analyses physico-chimiques *in situ***

| **Paramètres** | **Méthodes** | **Equipements** |
|---|---|---|
| Potentiel d'hydrogène | Méthode électrométrique | pH-mètre |
| Température | Méthode électrométrique | Thermomètre |
| Conductivité électrique | Méthode électrométrique | Conductimètre |
| TDS | Méthode électrique<br>Electrométrique | Conductimètre |
| Oxygène dissous | Méthode volumétrique de Winkler<br>modifié par Alsterberg | Oxymètre |
| Turbidité | Méthode néphélométrique | Turbidimètre |

### II .3.4.Analyse des paramètres chimiques

Les paramètres chimiques analysés sont : calcium, nitrates, nitrites, phosphates, dureté totale, fer et magnésium. Pour déterminer la concentration de ces paramètres chimiques, les trois méthodes d'analyse ont été appliquées en récurrence méthode titrimetrique à l'EDTA, les méthodes spectrophotométriques et la méthode de titrage volumétrique. En effet la méthode de titrage volumétrique a été utilisée pour le dosage du calcium ($Ca^{2+}$), du magnésium ($Mg^{2+}$), le fer ($Fe^{2+}$) et de la dureté totale de l'eau. Cette méthode titrimétrique permet d'avoir des résultats satisfaisants pour le contrôle de la qualité de l'eau (Rodier et al., 2016). Les nitrates ($NO_2^-$), les nitrites ($NO_3^-$) et les phosphates ($PO_4^{3-}$) ont été mesurés par photométrie. Cette méthode consiste à mesurer la densité optique des substances chimiques en fonction de leur longueur d'onde. Le tableau ci-dessous montre les méthodes analytiques pour les analyses chimiques.

**Tableau 11:Méthodes analytiques pour les analyses chimiques**

| **Paramètres** | **Méthodes** | **Equipements** |
|---|---|---|
| Nitrates, Phosphates, Nitrites | Méthode titrimétrique | photomètre |
| Calcium, Fer, Magnésium | Méthode titrimétrique | - |
| Dureté totale | Méthode titrimétrique | - |

**II .3.5.Analyse des paramètres microbiologiques**

Les échantillons destinés à l'analyse microbiologique ont été prélevés dans des flacons stériles. Après le prélèvement, les flacons ont été lisiblement étiquetés (le lieu du prélèvement, la date et l'heure) puis transportés dans une glacière (+4°C) à l'abri de la lumière au laboratoire de l'Université du Burundi, distance de 20 à 30 km de la zone d'échantillonnage.

Les paramètres microbiologiques recherchés dans cet étude sont : coliformes totaux, les coliformes fécaux, *Escherichia coli, Vibrio cholerae* et les Salmonella. Deux méthodes ont été utilisées pour isoler ces germes notamment la méthode de filtration sur membrane et la méthode de dilution (Soncy et al., 2019).

Les manipulations sont réalisées dans une zone aseptique près du bec Benzène. Avant de procéder aux analyses des échantillons, tous les milieux de culture et le matériel nécessaire ont été préalablement préparés (Rodier, 1984).

Avant d'ensemencer les milieux de culture, des dilutions ont été effectuées en cascade de $10^{-1}$ à $10^{-3}$. Nous prélevons du flacon contenant d'eau à analyser 1 ml que nous déposons dans un des tubes contenant les 9 ml de l'eau physiologique ; la première dilution est marquée par le chiffre $10^{-1}$, nous homogénéisons le tube par un léger mouvement, puis nous prélevons 1 ml de ce dernier tube pour le mettre dans un deuxième tube contenant également 9 ml de l'eau physiologique ; deuxième dilution marquée par le chiffre$10^{-2}$, nous répétons la même action pour obtenir la dilution à $10^{-3}$. Il faut noter que la pipette ne doit pas entrer en contact, ni avec la paroi des tubes, ni avec l'eau physiologique.

A partir de l'échantillon à analyser et de série des dilutions déjà préparées, porter des gouttes dans des boites de pétri vides préparées à cet usage et numérotées. Retourner les boites et incuber une série de boites à 37 °C et une autre série à 22 °C pendant 24h à 48h.

La lecture se fait après chaque 24 heures où on calcule le nombre de colonies formées présentes dans 100 millilitre d'échantillon. Les résultats sont exprimés en nombre de germes par 100 millilitres (germes/100 ml).

### III.3.6. Traitement et analyse des données

Les logiciels Arc GIS pour la conception des cartes, Word, Excel pour la saisie et l'analyse des données ont été utilisés. Ainsi donc, des tableaux et des graphiques nous ont permis de présenter les données recueillies. L'analyse statistique des données physico-chimiques a été faite sur une matrice de données constituée de 18 paramètres et de 9 forages de choix parmi les 52 forages localisés dans la commune Mutimbuzi. Les résultats ont été comparés aux normes internationales de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine en vue d'en tirer des conclusions et recommandations spécifiques.

## CHAPITRE.III.PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

Ce chapitre concerne la présentation et la discussion des résultats obtenus. Ils seront présentés sous forme d'histogrammes pour bien visualiser les différences entre les échantillons. Les paramètres retenus pour les graphiques sont: pH, température, TDS, oxygène dissous, la conductivité électrique, turbidité, les nitrates, les nitrites, la dureté totale, le calcium, le magnésium, les phosphates, le fer, les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les salmonelles. Ces résultats seront comparés avec les normes de l'OMS.

### III.1. Paramètres physico-chimiques

#### 1. Potentiel d'hydrogène

La variation des valeurs de pH de l'eau des forages durant la période d'étude sont présentées à la figure 4. Les valeurs de pH enregistrées dans cette étude sont comprises entre 6,3 à 7,6. Le pH moyen est de 6,9±0,43 pour tous les puits de forages. Les valeurs obtenues sont conformes aux normes de l'OMS (6,5-9) sauf la valeur F2 (6,3) qui est inférieure à la normale. Les eaux de forage ont un pH voisin de la neutralité. Ces valeurs sont proches de celles trouvées par Bakouan et al.,( 2017) en Algérie où il a trouvé un pH moyen de 6,8. Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico-chimiques et l'action de l'eau sur la dureté et l'odeur de l'eau (Meriem et Ouissem, 2017).

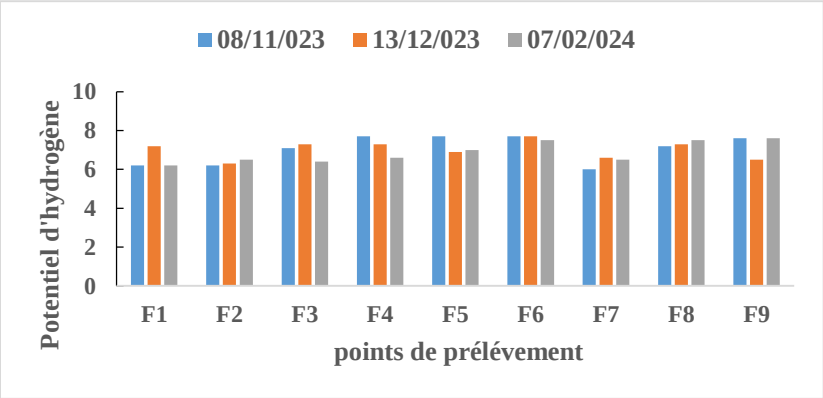



**Figure 4:Variation du pH dans les points de prélèvement**

## 2. Température

La figure 5 montre que la température notée au cours de ce travail a varié de 27,9$^0$C à 30,7$^0$C avec une moyenne générale de 28,8$^0$C ±0,96 de tous les puits de forages échantillonnés. La valeur minimale a été trouvée dans le F5 et la valeur maximale dans le F9. La valeur moyenne est supérieure aux normes de l'eau de consommation recommandée par l'OMS. Cette variation de la température est liée à celle de la température atmosphérique , de la nature du sol et la profondeur des forages (Amadou et al., 2018). Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels. Généralement, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent (Ghazali et Zaid, 2013).

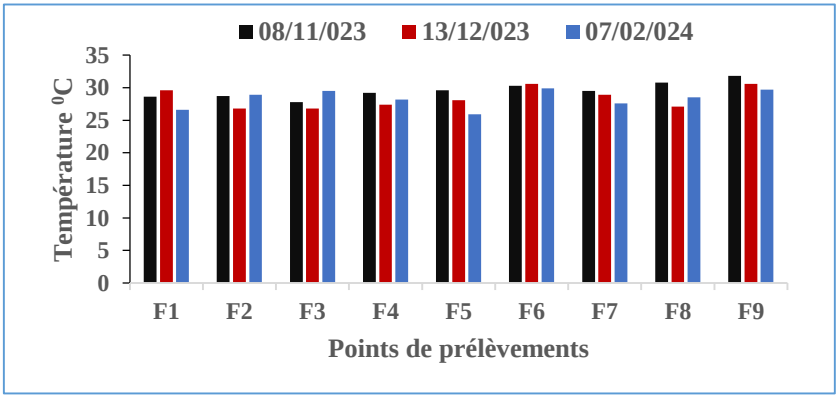



**Figure 5:Variation de la température dans les points de prélèvement**

## 3. La turbidité

Dans le présent travail, les résultats montrent que la turbidité a varié entre 1,2 à 12,27 NTU (figure 6) avec une moyenne générale de 5,17± 3,0 NTU de tous les puits de forages échantillonnés. La valeur minimale est notée dans le forage 3 tandis que la valeur maximale est observée dans le forage 2. La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules suspendues qui la troublent, c'est un paramètre qui reflète la qualité physique des eaux (Meriem et Ouissem, 2017). Pour une désinfection efficace, l'OMS recommande des turbidités inférieures à 5 NTU (ACF, 2006). Parmi les 9 forages soumis à l'étude. Quatre (04) forages (F2, F4, F6, F7) ont une valeur supérieure à 5 NTU.

La figure 6 montre que la valeur moyenne (5,17± 3,0 NTU) est supérieure aux normes de l'eau de consommation recommandée par l'OMS donc ces teneurs de turbidité enregistrées dépassent légèrement la valeur limite acceptable pour les eaux destinées à la consommation humaine qui est de 5NTU. La turbidité est très élevée dans le F2 avec 7 NTU. Quatre (04) ont une valeur de ce paramètre supérieure à 5 NTU. Les valeurs supérieures à la norme sont liées aux fortes activités agricoles et aménagement des rivières qui s'observent dans la commune Mutimbuzi.

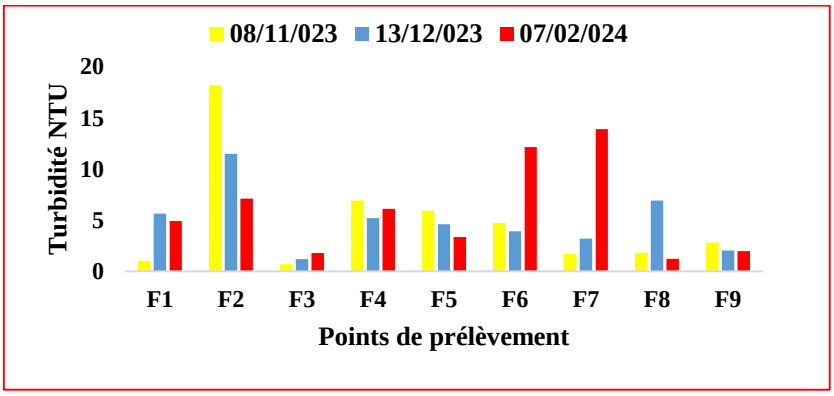



**Figure 6:Variation de la turbidité dans les points de prélèvement**

### 4. Oxygène dissous

La figure 7 montre que les valeurs de l'oxygène dissous obtenues dans cette étude oscillent entre un minimum de 0,47mg/L et maximum de 2,44 mg/L avec une moyenne générale de 1,45 ±0,7mg/l de tous les forages échantillonnés. La valeur minimale a été trouvée dans le F4 et la valeur maximale dans le F3. La valeur moyenne (1,45mg/L) est inférieure à 3mg/L alors que la valeur doit être supérieure ou égale à 3mg/L d'où les valeurs de l'oxygène dissous ne répondent pas aux valeurs seuil de l'eau de consommation recommandée par l'OMS. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments (Tfeila et al., 2016).

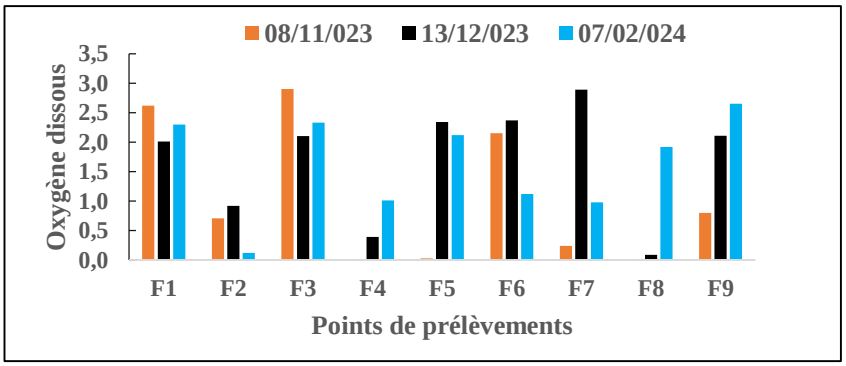



**Figure 7:Variation de l'oxygène dissous dans les points de prélèvement**

## 5. Conductivité électrique

Les mesures de la conductivité électrique que nous avons enregistrées varient entre 590 µS/cm à 1226 µS/cm (figure 8) avec une moyenne générale de 862 ±184 µS/cm pour tous les puits de forages. La valeur minimale est notée dans le forage 3 alors que la valeur maximale a été trouvée dans le forage 8.

La conductivité électrique est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. Par contre, les composés organiques sont des mauvais conducteurs électriques. En effet, plus la conductivité est élevée plus l'eau est fortement minéralisée (Tfeila et al., 2016). L'eau est fortement minéralisée dans l'eau de forages de Maramvya 13ème Avenue (F6=1226 µS/Cm). Cette conductivité électrique serait due aux activités agricoles tout autour du puits de forage. En comparant les valeurs de la conductivité détectées au niveau des eaux étudiées dans 9 forages on constate que l'eau de F6 est plus minéralisée par rapport aux autres eaux de forages.

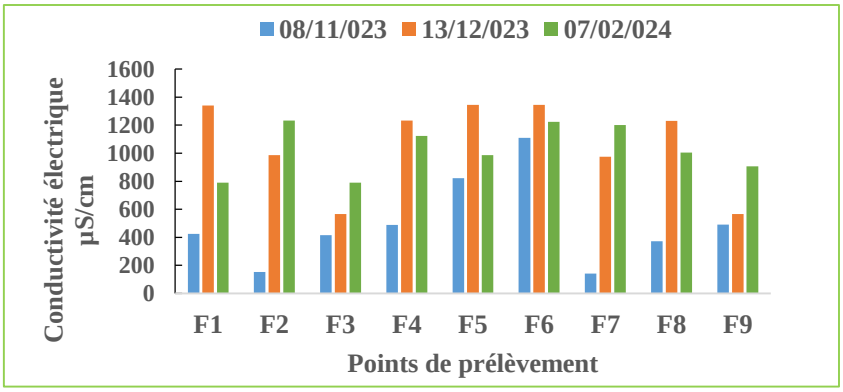



**Figure 8:Variation de la conductivité électrique dans les points de prélèvement**

## 6. Solides totaux dissous

Les résultats de l'analyse physico-chimique montre que la teneur moyenne (357 ±135 mg/L) des solides totaux dissous répond aux normes de potabilité recommandée par l'OMS sauf l'échantillon prélevé en date du 7 février 2024 où la concentration en TDS était de 656 mg/L (F6). Les valeurs enregistrées pour les TDS dans la présente étude varient entre 181 et 618 mg/L (Figure 9). La valeur maximale a été enregistrée dans le forage 7 et la valeur minimale a été notée dans le forage 4.

Les TDS représentent la concentration totale des substances (ions) dissoutes dans l'eau. Il est composé de sels inorganiques (calcium, magnésium, potassium, carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates) (Maoudo et Diane, 2020).

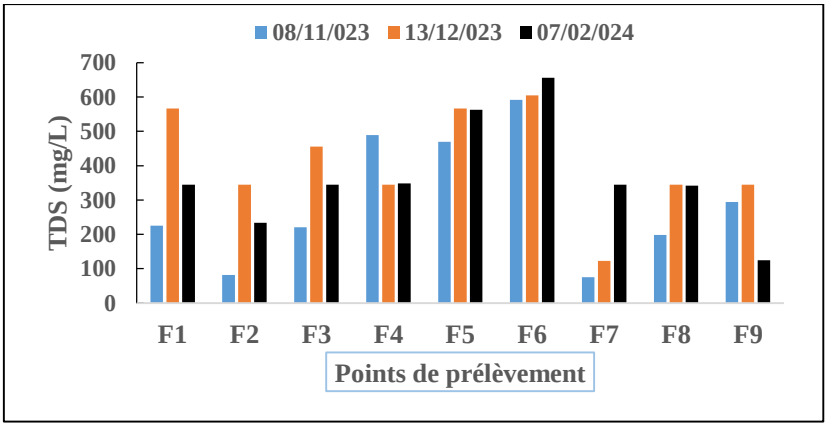



**Figure 9:Variation des solides totaux dissous dans les points de prélèvement**

**7. Nitrates**

Les valeurs de la concentration des nitrates obtenues dans la présente étude varient de 10,5mg/L à 59,7 mg/L (figure10) avec une moyenne générale de 39,5 ±19,3 mg/l de tous les forages échantillonnés. La valeur minimale a été enregistrée dans F9 alors que la valeur maximale a été observée dans F2. La valeur moyenne remplit les normes de l'eau de consommation recommandée par OMS.Les analyses réalisées à partir des échantillons d'eau recueillie au niveau des puits de forages ont révélé la présence non négligeable de nitrates dans l'eau de consommation, le seuil recommandé (50mg/L) étant parfois dépassé pour certains forages F2=59,7mg/L; F4=55,1mg/L;F5=58,2mg/L;F6=55,7mg/L de manière relativement importante. L'eau des puits de forages Rubirizi, Samariro, Maramvya 13ème Avenue, Maramvya 15ème Avenue contiennent des nitrates. Ce sont des forages situés dans la zone rizicole où on utilise le plus souvent des engrais pour fertiliser les champs.

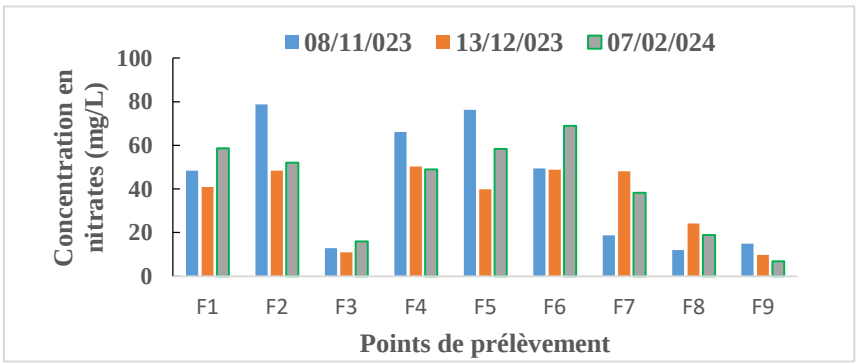



**Figure 10:Variation de la concentration des nitrates dans les points de prélèvement**

**8. Nitrites**

La teneur en nitrites notée dans la présente étude a varié de 0,05 à 0,32 mg/L (Figure11). La valeur minimale a été enregistrée dans F9 tandis que la valeur maximale a été observée dans F2. La concentration en nitrites moyenne est de 0,22 ± 0,07mg/L pour tous les points de prélèvement. La valeur moyenne générale dépasse légèrement la valeur guide (0,2 mg/L) pour les eaux destinées à la consommation humaine de l'OMS. Les valeurs supérieures à la norme sont notées dans les forages F2=0,22mg/L; F4=0,34 mg/L;F5=0,4 mg/L et F6=0,3 mg/L respectivement dans des sites Gahahe, Samariro, Maramvya 15ème Avenue, Maramvya 13ème Avenue.

La présence de nitrites dans l'eau des forages en quantité importante peut dégrader sa qualité et affecter la santé humaine à cause de son pouvoir oxydant (Maoudo et Diane, 2020). Ainsi, le lessivage des fertilisants agricoles peut entrainer une contamination en nitrites des nappes aquifères. Ces résultats diffèrent beaucoup de ceux trouvés par Maoudo et al. (2020) dans son étude réalisée au Sénégal dans la commune de Sinthiou en matière où les teneurs en nitrites étaient de 0,06± 0,007 mg/L. Cela pourrait être due par l'intensification des activités agricoles et la nature du sol selon Bakouan et al.( 2017).

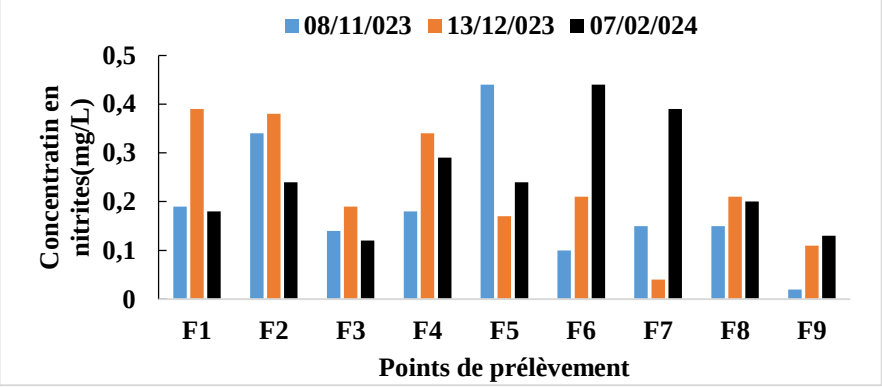



**Figure 11:Variation de la concentration des nitrites dans les points de prélèvement**

**9. Phosphates**

Les résultats enregistrés pour les phosphates dans le présent travail ont varié de 0,05 à 0,4 mg/L (figure 12).

La valeur minimale a été notée dans F9 tandis que la valeur maximale a été observée dans le F5 .La concentration moyenne générale est de 0,35 ± 0,12 mg/L pour tous les points

de prélèvement. La valeur moyenne est supérieure aux normes de l'eau de consommation recommandée par OMS.

Les phosphates sont naturellement présents dans le sol (matières minéraux organiques) mais leur principale source dans les eaux souterraines sont les activités agricoles: lessivage et infiltration (Maoudo et Diane, 2020).

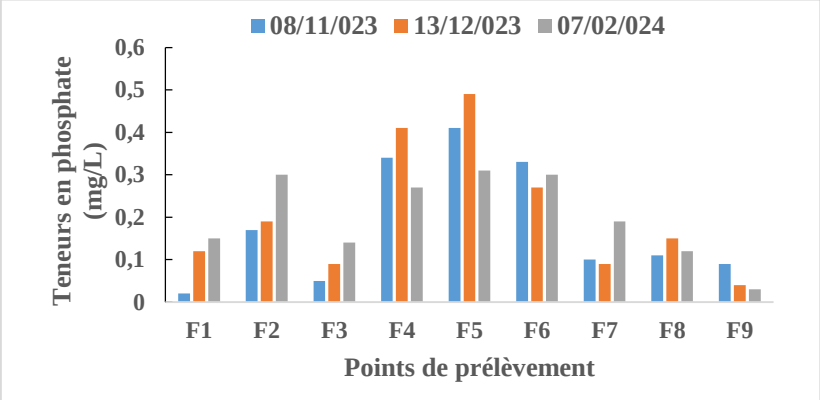



**Figure 12:Variation de la concentration des phosphates dans les points de prélèvement**

**10. Dureté totale**

D'après les résultats obtenus, la dureté totale enregistrée dans la présente étude a varié de 243,3 à 475,3 mg/L de $CaCO_3$ (figure13). La valeur minimale a été notée dans F3 tandis que la valeur maximale a été observée dans F4. La dureté totale moyenne est de 363,2 ± 66,0 mg/L de $CaCO_3$ pour tous les puits forés. La dureté de l'eau est un indicateur du niveau de calcaire dans l'eau. Elle correspond à sa teneur en calcium et en magnésium (Maoudo et Diane, 2020). Plus une eau en contient, plus elle est dure. Selon le guide OMS, boire de l'eau calcaire ou dure n'est pas contre-indiqué. Nous remarquons que parmi les échantillons des eaux de 9 puits de forages, 7 puits présentent des valeurs de dureté élevées notamment les forages F1=407,3 mg/L; F2=391,7 mg/L; F4=475,3 mg/L; F5=351 mg/L; F6=420,7 mg/L F7=329,7 mg/L et F8=356,7 mg/L respectivement dans des localités Gatunguru, Gahahe, Samaroro, Maramvya 15$^{ème}$ Avenue, Maramvya 13$^{ème}$ Avenue, Rukaramu et Kajaga où leurs valeurs dépassent 100 à300 mg/L (Norme de l'OMS). La valeur moyenne est supérieure aux normes de l'eau de consommation recommandée par OMS. D'une manière générale l'eau de la commune Mutimbuzi est dure. Ces résultats divergent avec ceux trouvés en 2022 par (Tidjan et Serraoui, 2019) où ils ont trouvé que la dureté totale des eaux de forage est très élevée. Cela pourrait être dû à la nature de la roche.

L'eau dure n'est pas dangereuse pour la santé. Les inconvénients sont plutôt d'ordre domestique en raison de la précipitation du calcaire (carbonate de calcium) diminuant ainsi l'efficacité des détergents (Maoudo et Diane, 2020).

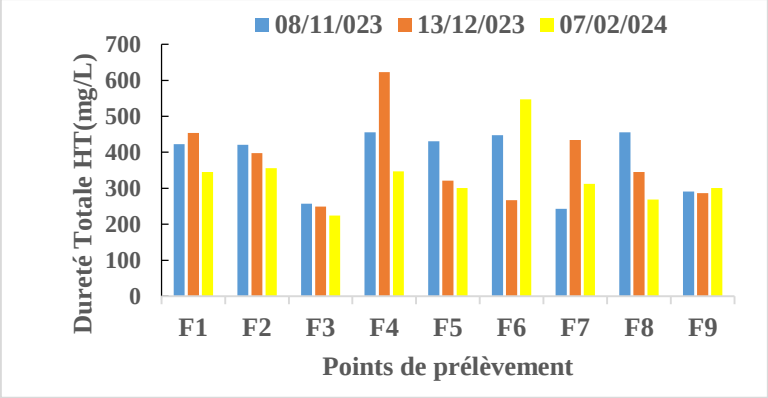



**Figure 13:Variation de la dureté totale dans les points de prélèvement**

**11. Calcium**

La figure 14 nous montre que la teneur moyenne en calcium est de 106,2± 9,9 mg/L dans les échantillons des eaux de forages et dépassent la valeur guide (100 mg/l) pour les eaux destinées à la consommation humaine (OMS, 2019). La concentration de calcium enregistrée dans le présent travail a varié de 89,1 à 119 mg/L. La valeur minimale a été notée dans le F3=89,1 mg/L (Tenga) tandis que la valeur maximale a été observée dans le F7=119 mg/L (Rukaramu).Le calcium est un élément principal de la dureté de l'eau, c'est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates $CaCO_3$ (Tidjan et Serraoui, 2019).

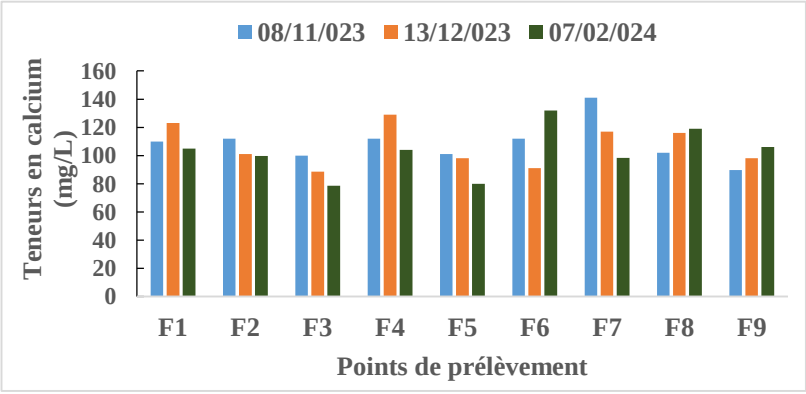



**Figure 14:Variation de la concentration de calcium dans les points de prélèvement**

**12. Magnésium**

La teneur en magnésium notée dans la présente étude est de 43,6 à 58,2 mg/L pour tous les points de prélèvement (Figure 15). La valeur minimale (43,6 mg/L) a été notée dans le F3 situé dans la localité de Tenga tandis que la valeur maximale (58,2 mg/L) a été observée dans le F1 situé dans la localité de Gatunguru. La concentration moyenne en magnésium est de 50,2 ± 5,3 mg/L pour toutes les eaux de forages soumises à l'étude. La valeur moyenne est légèrement supérieure aux normes de l'eau de consommation recommandée par OMS. Le magnésium ($Mg^{2+}$) est un élément qui accompagne souvent le calcium, il provient des calcaires dolomitiques et minéraux ferromagnésiens (Maoudo et Diane, 2020). Cela signifie que la structure géologique des sites de forage de Mutimbuzi est riche en calcaire dolomitique.

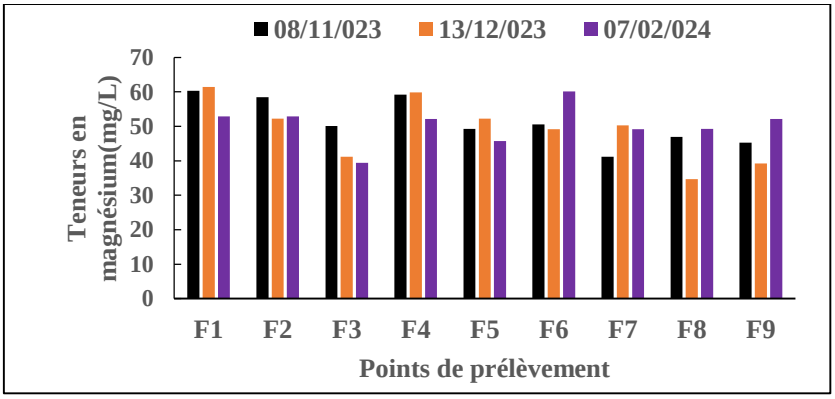



**Figure 15:Variation de la concentration de magnésium dans les points de prélèvement**

**13. Fer**

La figure 16 montre que les valeurs trouvées pour le fer durant cette étude varient de 0,24 à 0,46mg/L avec une moyenne générale de 0,32 ±0,06 mg/L. La valeur maximale a été enregistrée dans le F6=0,46mg/L situé à Maramvya 13ème Avenue et la valeur minimale a été notée dans le F7=0,46mg/L situé à Rukaramu. La moyenne générale du fer pour tous les puits de forages a dépassé légèrement les normes de l'eau de consommation recommandée par l'OMS (0,3 mg/L). Le fer est naturellement présent dans les eaux souterraines sous forme ferreux ($Fe^{2+}$) soluble ou sous forme ferrique ($Fe^{3+}$) (Oga et al., 2009).

Cette norme a été définie pour répondre aux critères esthétiques et organoleptiques qu'aux critères sanitaires.

Donc, le fer confère à l'eau un goût métallique désagréable, un aspect et une couleur rouge brun, ce qui amène les populations à se tourner vers d'autres sources d'approvisionnement (Amadou et al., 2018).

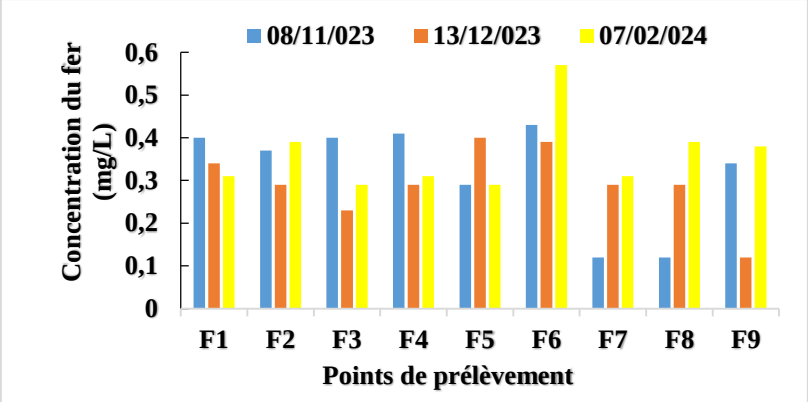



**Figure 16:Variation de la concentration du fer dans les points de prélèvement**

## III.2. Paramètres microbiologiques

### 1. Coliformes totaux

La figure17 montre que les résultats obtenus après l'analyse bactériologique de 27 échantillons d'eau prélevé dans 9 puits de forages ne sont pas conformes aux normes de l'OMS (0 UCF /100ml). On constate que le nombre de coliformes totaux varie entre 0 et 7 CT/100ml qui représente une valeur maximale trouvée dans le F5=7 CT/100ml et 0 dans les F3, F8 et F9. La valeur moyenne est égale à 2 CT/100ml pour tous les points de prélèvement. La valeur la plus élevée (10 CT/100ml) est observée en date du 13 décembre en 2023 dans le F5. Les eaux du F5 sont plus contaminées par rapport aux forages, cela s'explique par le fait que le F5 se trouve tout près des ménages et à côté de la riziculture. Ces résultats divergent avec ceux obtenus par (Djebbar et Chitti, 2021) où la valeur moyenne est 0UCF /100ml dans son étude sur la qualité bactériologique et parasitologique des eaux de forage de Boukhalfa en Algérie. L'analyse bactériologique de l'eau permet de montrer la contamination de l'eau par des germes et la pollution de l'environnement. Elle représente également un bon moyen pour contrôler l'efficacité des mesures de protection ou de traitement (Ouhsassi et al., 2013).

La numération de coliformes totaux vise à estimer la densité de la population bactérienne présente dans l'eau potable, la plupart ne sont pas pathogènes (Boutaba, 2019). Cependant, certaines espèces peuvent être pathogènes, opportunistes et causer des infections chez les personnes dont le système immunitaire est affaibli.

En effet, la forte concentration en germes totaux génère des problèmes d'ordre organoleptique et sanitaire (Djebbar et Chitti, 2021).

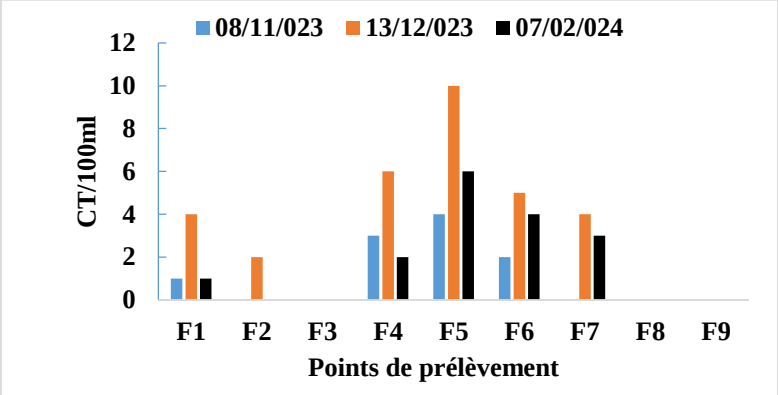



**Figure 17:Variation de la concentration des coliformes totaux**

## 2. Coliformes fécaux

La figure 18 montre que parmi les 9 forages choisis durant cette étude, eau de 4 forages (F3=Tenga, F6= Maramvya 13ème Avenue, F8=Kajaga, F9=Gatumba) ont 0 CF/100ml alors que les 5 autres en contiennent. D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que le nombre de coliformes fécaux varie de 0 à 1 CT/100ml en moyenne. La valeur maximale a été enregistrée dans le F2 et la valeur 0 dans les F3, F6 F8 et F9. La valeur moyenne est égale au 0,3 CF pour tous les forages. Le nombre le plus élevé (2 CF/100ml) est observé en date du 13 décembre en 2023 dans le F1et en date du 7 février 2024. Ceci serait dû aux pluies qui les ont entrainés jusque dans les puits étudiés.

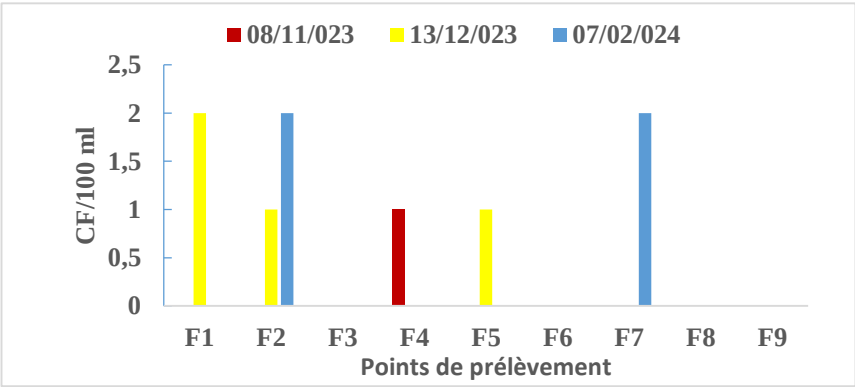



**Figure 18:Variation de la concentration des coliformes fécaux dans les points de prélèvement**

### 3. Salmonelles

La figure 19 montre que la concentration des Salmonelles enregistrée dans le présent travail a varié de 0 à 2,3 Salmonella/100ml. La valeur minimale de 0 a été notée dans les F3, F8 et F9 tandis que la valeur maximale a été observée dans F4. La concentration la plus élevée est observée dans F4 en date du 8 novembre 2023. Les concentrations dans les F3, F8 et F9 sont nulles dans toutes les périodes de prélèvement. Pour les Salmonelles, la concentration est de 0UFC/100ml dans 3 forages (F3=Tenga, F8=Kajaga, F9=Gatumba) et sont conformes aux normes de l'OMS (0 UFC/100ml). Contrairement aux 6 autres forages où la concentration des salmonelles moyenne est de 0,5 UFC/100ml pour tous les points de prélèvement.

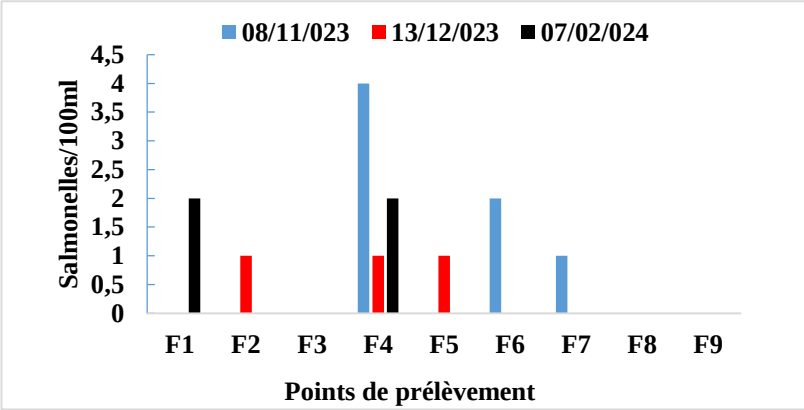



**Figure 19: Variation de la concentration des salmonelles dans les points de prélèvement**

## CONCLUSION

Cette étude sur la «Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de forages » est une étude analytique qui s'est déroulée pendant la période du mois de novembre 2023 au mois de février 2024. Au total 9 sur 52 puits de forages identifiés ont été échantillonnés au cours de cette période. Chaque puits a été échantillonné 3 fois soit 27 échantillons collectés dans des moments différents. Treize (13) paramètres physico-chimiques et 5 paramètres microbiologiques ont été mesurés. Ainsi, la température, turbidité, oxygène dissous, nitrites, dureté totale, calcium, magnésium, fer, phosphates, coliformes totaux, coliformes fécaux et les salmonelles affichent des résultats anormaux alors que la conductivité électrique, TDS, nitrates, phosphates, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae* sont normaux.

Cette étude a révélé que des eaux de forage n'ont pas de bonne qualité sauf les 2 puits de forages construits par la Regideso (F8 : Kajaga, F9 : Gatumba) et un forage privé (F3 :Tenga) qui répondent aux normes de l'OMS. D'une matière générale des eaux de forage utilisées par la population contiennent des substances chimiques et des bactéries pathogènes qui les rendent impropre à la consommation humaine. Pour cela, des recommandations sont formulées à l'endroit de tous les intervenants en vue d'améliorer des conditions de santé de la population et préserver l'environnement.

## RECOMMANDATIONS

Aux termes de cette étude, il s'avère nécessaire de donner des recommandations :

- Au gouvernement du Burundi via le MSPLS, MIELS, MEAE et MEM :
  - Etendre les systèmes d'évacuation des eaux usées dans toutes les collines de la commune Mutimbuzi;
  - S'éloigner des milieux agricoles, sources de contamination des forages;
  - Approvisionner suffisamment en eau potable tous les quartiers de la commune Mutimbuzi par système de borne fontaine;
  - Suivre qualitativement et quantitativement les eaux de forages de ladite commune.
  - Mettre en place un office burundais pour le contrôle et le suivi de la qualité de l'eau en général et des forages en particulier

- Aux autorités sanitaires et administratives de la commune Mutimbuzi:
  - Informer régulièrement la population de la commune Mutimbuzi des conséquences néfastes liées à la consommation de l'eau de forage qui ne répond pas aux normes de l'OMS
  - Renforcer les stratégies d'IEC pour le changement de comportement de la population de la commune Mutimbuzi à travers les techniciens de promotion de Santé en matière de la prévention des maladies hydriques.
  - S'assurer que la profondeur des forages répond aux normes internationales selon la nature du sol.
- A l'administration locale de Mutimbuzi :
  - Appliquer les stratégies de mobilisation de la population en vue d'éviter le rejet des déchets n'importe où ;
  - Mobiliser et sensibiliser la population d'empêcher la conception des latrines tous près des puits de forages ;
  - Eviter d'implanter les puits de forages à côté des rivières, des latrines, des rizicultures,
  - Organiser des descentes dans les ménages pour vérifier l'application des règles d'assainissement, d'hygiène et de la préservation de l'environnement.
  - Conscientiser la population à bouillir l'eau à 100°C pour tuer les microbes contaminants
- A la population
  - Avoir des connaissances en matière de protection des forages ;
  - Eviter la vidange manuelle des fosses septiques dans les ménages ;
  - Mettre en application des règles d'hygiène et d'assainissement,
  - Assurer une bonne gestion des déchets solides et liquides.
- Aux chercheurs
  - Déterminer la teneur des métaux lourds et des pesticides dans l'eau de forage
  - Faire une étude de la pollution de la nappe phréatique

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Aggoune Kouds, B. N. (2019). Analyses des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux du barrage Bouhamdane de Hammam Debagh et des quatre forages de la nappe phréatique d'Oued El Maiz-Guelma.

Amadou, H., Laouali, M. S., & Manzola, A. (2018). Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de trois aquifères de la région de Tillabery : Application des méthodes d'analyses statistiques multi variées. 20.

Amaramadi Ahmed, T. H. (2013). Qualité bactériologique et physico-chimique des eaux souteraines de la plaine de Tamlouka (Nort-Est DE L'Algérie).

Andriamanjato, N. (2019). Controle de qualité et études hydrochimiques des eaux de forages dans la commune Sarobaratra,District de TsaratananaC. http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/andriamanjatoNajaF_PC_MAST_19.pdf

Assangbe et Avocefohoun. (2018). Caractérisation physico-chimique et microbiologique des eaux usées de la cimenterie cimbenin saa Seme-podji. EPAC/UAC.

Ayad, W., et Kahoul, M. (2016). Evaluation de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux de puits dans la région d'El-Harrouch (NE-Algérie)[Assessment of physico-chemical and bacteriological quality of Well water in the region of El-Harrouch (NE-Algeria)]. Journal of Materials and Environmental Science, 7, 1288-1297.

Bakouan, C., Guel, B., et Hantson, A.-L. (2017). Caractérisation physico-chimique des eaux des forages des villages de Tanlili et Lilgomdé dans la région Nord du Burkina Faso-Corrélation entre les paramètres physico-chimiques. Afrique Science, 13(6), 325-337.

Bidon. (2020). Qualité physico-chimique et microbiologique des eaux embouteillées.

Dana Saleh MD. (2022). Méthémoglobinémie due à une surdose de nitrite de sodium.

Djebbar, I., et Chitti, T. (2021). Etude de la qualité bactériologique et parasitologique des eaux de consommation des forages de Boukhalfa (Tizi-Ouzou) [PhD Thesis]. Université Mouloud Mammeri.

Dos Santos, S. (2018). La qualité de l'eau en milieu Urbain informel : Une dimension majeure de l'accès à l'accès à l'eau potable.

Dovonou, F. (2018). Pollution des eaux souterraines par les méteaux lourds et lleur impact sur l'environnement : Cas de l'aquifère superficiel du champ de captage intensif de godomey au Sud Benin.

DSNIS Burundi. (2022). Les données relatif du système national d'information sanitaire au Burundi.

El Ouedghiri, K., El Oualti, A., El Ouchy, M., Zerrouq, F., Chahdi, F., & Lalami, A. (2014a). Risques sanitaires liés aux composés chimiques contenus dans l'eau de boisson dans la ville de Fès : Cas des ions nitrates et nitrites. 5, 2284-2292.

El Ouedghiri, K., El Oualti, A., El Ouchy, M., Zerrouq, F., Chahdi, F., & Lalami, A. (2014b). Risques sanitaires liés aux composés chimiques contenus dans l'eau de boisson dans la ville de Fès : Cas des ions nitrates et nitrites (Health risks of the chemicals in drinking water in the city of Fez: nitrate and nitrite ions). J. Mater. Environ. Sci, 5, 2284-2292.

Garcia-Armisen, T. (2006). Etude de la dynamique des Escherichia coli dans les rivières du bassin de la Seine. Université Libre de Bruxelles.

Ghazali, D., et Zaid, A. (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès-Maroc). 12.

Haoussa, N. (2013). Etude de la qualité des eaux des mélanges ''Eau d'oued Biskra-Eau de Droh'' [Master's Thesis].

Hounzinme, G. E., et Adandedia, C. (2017). Qualités physico-chimique et microbiologique de l'eau des PEA privés de l'arrondissement de Hounli dans la commune d'Abomey (centre Bénin). A.

ISTEBU. (2008). Base des données pour les indicateurs du DHD 2009. In Reencensement Général de la population du Burundi (p. 205).

Kaboré, A., Zongo, I., Savadogo, B., Sawadogo, J., Kaboré, D., et ZP, L. (2020). Evaluation de la qualité physicochimique de l'eau des forages dans la région du centre-nord au Burkina Faso : Cas des écoles primaires [Assessment of physicochemical quality of drinking water from boreholes in the Centre-North région in Burkina Faso: Case of elementary schools]. International Journal of Innovation and Applied Studies, 29(4), 1349-1357.

Manceur, Y., et Djaballah, S. (2016a). Analyse microbiologique de l'eau distribuée dans la ville de Tébessa. Universite laarbi tebessi tebessa.

Manceur, Y., et Djaballah, S. (2016b). Analyse microbiologique de l'eau distribuée dans la ville de Tébessa. Universite laarbi tebessi tebessa.

Maoudo, H., et Diane, I. (2020). Etude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits et de forage consommées dans la commune de Sinthiou Maléme dans la région de Tambacounda (Sénégal). 14(9), 3400-3412.

Marchal, F., et Rabier, P. (2011). Évaluation de l'incertitude de mesure du titre hydrotimétrique d'une eau de boisson. Le Bup, 105, 719.

Meriem, N., et Ouissem, A. (2017). Contrôle de qualité microbiologique et physico-chimique de l'eau de source Chiffa.

Mutimbuzi. (2023). Plan de développement communal.

Nouayti, N., Khattach, D., et Hilali, M. (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc)[Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco)]. Journal of Materials and Environmental Science, 6(4), 1068-1081.

Oga, M.-S., Lasm, T., Yao, T. K., Soro, N., Saley, M. B., Kouassi, D., & Gnamba, F. (2009). Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture : Cas de La Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. European Journal of Scientific Research, 31(1), 72-87.

Ombala, R. (2013). Étude de l'accessibilité à l'eau potable dans les villages pilotes du projet irrigation de complément et information climatique dans la commune de Kongoussi [PhD Thesis, Institut International d'Ingénierie, Ouagadougou, BF]. https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/52340

OMS. (2006). Les normes de qualité pour l'eau potable.

OMS. (2011). Directives de qualité pour l'eau de boisson. In Journal of chemical information and Medeling (4th éd.).

Ouhsassi, M., Khay, e. o., Amajoud, N., & Abrini, J. (2013). Etude de la qualité microbiologique des eaux Skundo, Medina de Tetouan,Maroc. Sciencelib.

Robert-Pillot, A., Baron, S., Lesne, J., Fournier, J.-M., et Quilici, M.-L. (2006). Détection de Vibrio cholerae dans un écosystème marin par hybridation moléculaire après culture sur un milieu sélectif. Hydroécologie Appliquée, 15, 97-105.

Rodier, J. (1984). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer : Chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie. (No Title). https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282269800540416

Rodier, J., Legube, B., et Merlet, N. (2016). L'analyse de l'eau-10e éd. Dunod.

Samaké, H. (2002). Analyse physico-chimique e : T bactériologique au LNS des eaux de cnsommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001 [PhD Thesis, Université de Bamako]. https://bibliosante.ml/handle/123456789/6735

Soncy, K., Djeri, B., Anani, K., Eklou-Lawson, M., Adjrah, Y., Karou, D. S., Ameyapoh, Y., & De Souza, C. (2019). Évaluation de la qualité bactériologique des eaux de puits et de forage à Lomé, Togo. Journal of Applied Biosciences, 91, 8464-8469.

Tfeila, M. M., MOSA KO, S. S., Aboulhassan, M. A., Taleb, A., & Bouezmarni, M. (2016). Suivi de la qualité physicochimique de l'eau du fleuve Sénégal : Cas du captage du Beni Nadji alimentant en eau potable les wilayas de Nouakchott. 7(1), 148-160.

Tidjan, A. F., et Serraoui, N. (2019). Etude hydrochimique de qualité des eaux Mio-Pliocien de la Willaya de Touggourt. Université Kasdi Merbah Ouargla.

Traore, i. s., & Kone, a. z. (2020). Evaluation de la qualité Bacteriologique des equx de puits, de forages et de Bornes fontaines de Senou dans la commune Vide Bamako. Revue Malienne de Science et de Technologie, 1(23), 33-41.

USAID Burundi. (2019). Etude sur la politique Sectorielle d'utilisation de l'eau et la santé.

# ANNEXES

## Annexe 1 : Les résultats des paramètres physico-chimiques

| Points de prélèvement | Date d'analyse | PH | Température($0^0$C°) | Turbidité(NTU) | Oxygène dissout (mg/L) | électrique(µS/cm) | TDS(mg/L) | Nitrate(mg/L) | Nitrite(mg/L) | Phosphate(mg/L) | Dureté totale(mg/L) | Calcium(mg/L) | Magnésium(mg/L) | Fer(mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 08/11/023 | 6,16 | **28,6** | 1 | **2,62** | 424 | 225 | 48,3 | 0,19 | 0,02 | **423** | **110** | **60,3** | **0,4** |
| F1 | 13/12/023 | 7,16 | **29,6** | **5,6** | **2,01** | 1341 | 567 | 40,9 | **0,39** | 0,12 | **454** | **123** | **61,4** | 0,3 |
| | 07/02/024 | 6,19 | **26,6** | 4,9 | **2,3** | 789 | 345 | 58,7 | 0,18 | 0,15 | **345** | **105** | **52,9** | 0,3 |
| | 08/11/023 | 6,24 | **28,7** | 18 | **0,71** | 153 | 81,5 | 78,8 | **0,34** | 0,17 | **421** | **112** | **58,5** | **0,4** |
| F2 | 13/12/023 | 6,29 | **26,8** | 12 | **0,92** | 987 | 345 | 48,3 | **0,38** | 0,19 | **398** | **101** | **52,2** | 0,3 |
| | 07/02/024 | 6,48 | **28,9** | **7,1** | **0,12** | **1234** | 234 | 52,1 | **0,24** | 0,3 | **356** | 99,7 | **52,9** | **0,4** |
| | 08/11/023 | 7,14 | **27,8** | 0,7 | **2,9** | 415 | 221 | 12,8 | 0,14 | 0,05 | 257 | 100 | **50,1** | **0,4** |
| F3 | 13/12/023 | 7,35 | **26,8** | 1,2 | **2,1** | 567 | 456 | 10,9 | 0,19 | 0,09 | 249 | 88,5 | 41,2 | 0,2 |
| | 07/02/024 | 6,47 | **29,5** | 1,8 | **2,33** | 789 | 345 | 15,9 | 0,12 | 0,14 | 224 | 78,7 | 39,4 | 0,3 |
| | 08/11/023 | 7,69 | **29,2** | **6,9** | **0,02** | 489 | 489 | **66,2** | 0,18 | **0,34** | **456** | **112** | **59,2** | **0,4** |
| F4 | 13/12/023 | 7,32 | **27,4** | **5,2** | **0,39** | **1234** | 345 | 50,3 | 0,34 | **0,41** | **623** | **129** | **59,9** | 0,3 |
| | 07/02/024 | 6,62 | **28,2** | **6,1** | **1,01** | 1123 | 348 | 48,9 | **0,29** | **0,27** | **347** | **104** | **52,1** | 0,3 |
| | 08/11/023 | 7,69 | **29,6** | **5,9** | **0,03** | 822 | 470 | 76,3 | 0,44 | **0,41** | **431** | 101 | 49,3 | 0,3 |
| F5 | 13/12/023 | 6,91 | **28,1** | 4,6 | **2,34** | **1345** | 567 | 39,9 | 0,17 | **0,49** | **321** | 98,2 | **52,2** | **0,4** |
| | 07/02/024 | 7,02 | **25,9** | 3,4 | **2,12** | 987 | 563 | **58,3** | **0,24** | **0,31** | **301** | 79,9 | 45,7 | 0,3 |
| | 08/11/023 | 7,69 | **30,3** | 4,7 | **2,15** | 1110 | 592 | 49,4 | 0,1 | **0,33** | **448** | 112 | **50,6** | **0,4** |
| F6 | 13/12/023 | 7,61 | **30,6** | 3,9 | **2,37** | 1345 | **605** | 48,8 | **0,21** | **0,27** | 267 | 91,1 | 49,2 | **0,4** |
| | 07/02/024 | 7,52 | **29,9** | 12 | **1,12** | **1223** | **656** | **68,9** | **0,44** | **0,3** | **547** | **132** | **60,1** | **0,6** |
| | 08/11/023 | 6,08 | **29,5** | 1,7 | **0,24** | 142 | 75 | 18,7 | 0,15 | 0,1 | 243 | **141** | 41,2 | 0,1 |
| F7 | 13/12/023 | 6,64 | **28,9** | 3,2 | **2,89** | 974 | 123 | 48,1 | 0,04 | 0,09 | **434** | **117** | **50,3** | 0,3 |
| | 07/02/024 | 6,55 | **27,6** | 14 | **0,98** | **1200** | 345 | 38,3 | 0,39 | 0,19 | **312** | 98,3 | 49,2 | 0,3 |
| | 08/11/023 | 7,22 | **30,8** | 1,8 | **0,01** | 372 | 198 | 11,9 | 0,15 | 0,11 | **456** | **102** | 46,9 | 0,1 |
| F8 | 13/12/023 | 7,34 | **27,1** | **6,9** | **0,09** | **1230** | 345 | 24,1 | **0,21** | 0,15 | **345** | **116** | 34,7 | 0,3 |
| | 07/02/024 | 7,52 | **28,5** | 1,2 | **1,92** | 1004 | 342 | 18,9 | 0,2 | 0,12 | 269 | **119** | 49,3 | **0,4** |
| | 08/11/023 | 7,58 | **31,8** | 2,8 | **0,8** | 490 | 294 | 14,9 | 0,02 | 0,09 | 291 | 89,7 | 45,3 | 0,3 |
| F9 | 13/12/023 | 6,58 | **30,6** | 2 | **2,11** | 567 | 345 | 9,7 | 0,11 | 0,04 | 287 | 98,2 | 39,2 | 0,1 |
| | 07/02/024 | 7,61 | **29,7** | 2 | **2,65** | 907 | 125 | 6,9 | 0,13 | 0,03 | **300,8** | **106** | **52,1** | **0,4** |
| **Directive de l'OMS** | | **6,5-9** | **<25** | **<5** | **≥ 3** | **<1100** | **<600** | **<50** | **<0,2** | **<0,2** | **100-300** | **<100** | **<50** | **<0,3** |

**Annexe 2 :Résultats statistiques des paramètres physico-chimiques**

| Points de prélèvement | Ph | Température($0^0$C) | Turbidité(NTU) | Oxygène dissout(mg/L) | Conductivité électrique(µS/cm) | TDS(mg/L) | Nitrate(mg/L) | Nitrite(mg/L) | Phosphate(mg/L) | Duréte totale(mg/L) | Calcium(mg/L) | Magnésium(mg/L) | Fer(mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| F1 | 6,5 | 28,3 | 3,8 | 2,31 | 851 | 379 | 49,3 | 0,25 | 0,1 | 407,3 | 113 | 58,2 | 0,35 |
| F2 | 6,3 | 28,1 | 12,27 | 0,58 | 791 | 220 | 59,7 | 0,32 | 0,22 | 391,7 | 104 | 54,5 | 0,35 |
| F3 | 6,9 | 28 | 1,2 | 2,44 | 590 | 341 | 13,2 | 0,15 | 0,09 | 243,3 | 89,1 | 43,6 | 0,31 |
| F4 | 7,2 | 28,3 | 6,1 | 0,47 | 949 | 394 | 55,1 | 0,27 | 0,34 | 475,3 | 115 | 57,1 | 0,34 |
| F5 | 7,2 | 27,9 | 4,6 | 1,5 | 1051 | 533 | 58,2 | 0,28 | 0,4 | 351 | 93 | 49,1 | 0,33 |
| F6 | 7,6 | 30,3 | 6,9 | 1,88 | 1226 | 618 | 55,7 | 0,25 | 0,3 | 420,7 | 112 | 53,3 | 0,46 |
| F7 | 6,4 | 28,7 | 6,2 | 1,37 | 772 | 181 | 35 | 0,19 | 0,13 | 329,7 | 119 | 46,9 | 0,24 |
| F8 | 7,3 | 28,8 | 3,3 | 0,67 | 869 | 295 | 18,3 | 0,19 | 0,13 | 356,7 | 112 | 43,6 | 0,27 |
| F9 | 7,2 | 30,7 | 2,2 | 1,85 | 655 | 255 | 10,5 | 0,09 | 0,05 | 292,9 | 98 | 45,5 | 0,28 |
| Minimal | 6,3 | 27,9 | 1,2 | 0,47 | 590 | 181 | 10,5 | 0,09 | 0,05 | 243,3 | 89,1 | 43,6 | 0,24 |
| Maximal | 7,6 | 30,7 | 12,27 | 2,44 | 1226 | 618 | 59,7 | 0,32 | 0,4 | 475,3 | 119 | 58,2 | 0,46 |
| Etendue | 1,3 | 2,83 | 11,07 | 1,97 | 636 | 437 | 49,2 | 0,23 | 0,35 | 232 | 29,7 | 14,6 | 0,22 |
| Moyenne | 6,96 | 28,8 | 5,175 | 1,45 | 862 | 357 | 39,5 | 0,22 | 0,2 | 363,2 | 106 | 50,2 | 0,32 |
| Ecart type | 0,43 | 0,96 | 3,085 | 0,7 | 184 | 135 | 19,3 | 0,07 | 0,12 | 66,04 | 9,91 | 5,38 | 0,06 |
| Coef de variance | 0,06 | 0,03 | 0,596 | 0,48 | 0,21 | 0,38 | 0,49 | 0,31 | 0,6 | 0,182 | 0,09 | 0,11 | 0,19 |

**Annexe 3 :Analyse comparative entre les moyennes des paramètres physico-chimiques**

| Paramètre | Moyenne | Directive de l'OMS | Conformité avec les normes de potabilité |
|---|---|---|---|
| pH | 6,9 | 6,5-9 | Oui |
| Température | 28,8 | <25 | Non |
| Turbidité | 5,2 | <5 | Non |
| Oxygène dissous | 1,5 | ≥ 3 | Non |
| Conductivité électrique | 862 | <1100 | Oui |
| TDS | 357 | <600 | Oui |
| Nitrates | 39,5 | <50 | Oui |
| Nitrites | 0,22 | <0,2 | Non |
| Phosphates | 0,2 | <0,2 | Oui |
| Dureté totale | 363,2 | 100-300 | Non |
| Magnésium | 50,2 | <50 | Non |
| Calcium | 106 | <100 | Non |
| Fer | 0,32 | <0,3 | Non |

**Annexe 4 : Résultats des paramètres microbiologiques**

| Points de prélèvement | Date d'analyse | Coformes totaux /100ml | Coliformes fécaux/100ml | Escherchia coli/100ml | Vibrio cholerae/100ml | Salmonella/100 ml |
|---|---|---|---|---|---|---|
| F1 | 08/11/023 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| F2 | 08/11/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 07/02/024 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| F3 | 08/11/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F4 | 08/11/023 | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| | 13/12/023 | 6 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 07/02/024 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| F5 | 08/11/023 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 10 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 07/02/024 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F6 | 08/11/023 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| | 13/12/023 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F7 | 08/11/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 13/12/023 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| F8 | 08/11/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F9 | 08/11/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 13/12/023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 07/02/024 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Normes selon OMS | | 0 UCF/100ml | 0 UCF/100ml | 0 UCF/100ml | 0 UCF/100ml | 0 UCF/100ml |

**Annexe 5 :Les résultats statistiques des analyses microbiologiques**

| | Coformes totaux /1000ml | Coliformes fécaux/100 ml | Escherchia coli/100ml | Vibrio cholerae/100 ml | Salmonella/ 100ml |
|---|---|---|---|---|---|
| F1 | 2 | 0,6 | 0 | 0 | 0,6 |
| F2 | 0,6 | 1 | 0 | 0 | 0,3 |
| F3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F4 | 3,6 | 0,3 | 0 | 0 | 2,3 |
| F5 | 6,6 | 0,3 | 0 | 0 | 0,3 |
| F6 | 3,6 | 0 | 0 | 0 | 0,6 |
| F7 | 2,3 | 0,6 | 0 | 0 | 0,3 |
| F8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| F9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Minimal | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Maximal | 6,6 | 1 | 0 | 0 | 2,3 |
| Moyenne | 2,1 | 0,3 | 0 | 0 | 0,5 |

**Annexe 6 : Analyse comparative entre les paramètres microbiologiques et les normes**

| Paramètre | Moyenne | Directive de l'OMS | Conformité avec les Normes de Potabilité |
|---|---|---|---|
| Coliformes totaux | 2,1 | 0UCF/100ml | Non |
| Coliformes fécaux | 0,3 | 0UCF/100ml | Non |
| Escherchia coli | 0 | 0UCF/100ml | Oui |
| Salmonella | 0,5 | 0UCF/100ml | Non |
| Vibrio cholerae | 0 | 0UCF/100ml | Oui |