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

Caractérisation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface « cas de la rivière Nyakagunda dans les communes Mugina et Rugombo »

Mpfukamensabe, Fulgence; Sous la direction de : Prof. Simon Buhungu

2024-02
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/2083

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

CARACTERISATION DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX DE SURFACE « CAS DE LA RIVIERE NYAKAGUNDA DANS LES COMMUNES MUGINA ET RUGOMBO »

Par :

MPFUKAMENSABE Fulgence

Mémoire

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 :

Prof. Simon BUHUNGU

Bujumbura, février 2024

MEMBRES DU JURY

Président : Dr Lambert NIYOYITUNGIYE

Secrétaire : Dr Christophe NIYUNGEKO

Directeur : Prof. Simon BUHUNGU

DEDICACES

A Dieu Tout-Puissant ;

A Ma chère épouse NDUWIMANA Christine ;

A Mes enfants MPFUKAMENSABE Titia Karelle et MPFUKAMENSABE Gina Eurielle ;

A Mon père BIGIRIMANA Gabriel ;

A Ma regrettée mère NAHIMANA Suzanne ;

A Mes frères et sœurs.

Je dédie ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'efforts fournis par plusieurs personnes que nous aimerions remercier chacune pour sa tâche.

Notre profonde gratitude s'adresse d'abord au Directeur de ce mémoire Prof. BUHUNGU Simon, enseignant chercheur au Département de Biologie de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi. Malgré ses nombreuses responsabilités, il a accepté de diriger ce travail. Ses conseils et ses orientations scientifiques nous ont servis et nous aideront à progresser vers l'avant entant que jeune chercheur.

Nos remerciements et notre reconnaissance s'adressent aussi à tous les enseignants de l'université du Burundi en général et particulièrement ceux de la Faculté des Sciences, Département de Biologie qui se sont donné corps et âme pour que nous atteignions ce pas. Notre remerciement s'adresse aussi aux personnels de la REGIDESO spécialement le directeur des ressources humaines et le chef du Laboratoire pour m'avoir accordé la permission de travailler dans le laboratoire de bactériologie.

Nos remerciements s'adressent aussi à ma femme, à mes enfants pour leur soutien moral, et financier de nos études, qu'ils soient aussi assurés de notre pleine satisfaction. Permettez-nous d'adresser également nos sentiments de gratitude à nos collègues avec qui, nous avons partagé joie et peine durant toute la période de formation de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement et particulièrement ceux de la spécialité de l'Eau et Assainissement.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et qui ne sont pas cités sur cette page trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

Une étude sur la rivière Nyakagunda située en Province Cibitoke a été initiée. L'objectif était d'évaluer la qualité physico-chimique et microbiologique de ses eaux en vue de protéger cette ressource et prévenir la population population environnante contre les risques sanitaires. Les échantillons d'eau ont été collectés une fois par mois de 10h à 14h sur une période de 8 mois de mars à octobre 2022. Les paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH, les solides totaux dissous, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, la Demande biochimique en oxygène, la demande chimique en oxygène, les nitrites ,les nitrates, les phosphates ainsi que les paramètres bactériologiques comme les coliformes fécaux, les coliformes totaux et l' Escherichia coli ont été également analysés au cours de cette même période. Les méthodes standards d'analyse telles que AFNOR et APHA ont été utilisées afin d'atteindre cet objectif. Les résultats de cette étude ont montré que les paramètres analysés ont varié de l'amont vers l'aval et au cours du temps. Pour les ions phosphates nous avons trouvés une concentration hors normes aux mois de Juin et Août 0,31mg/l et 0,362mg/l respectivement. La faible concentration en oxygène dissous (inférieur à 8mg d'O2/l) nous renseigne sur la pollution organique de cette rivière. De même, nous avons trouvé la présence de la flore bactérienne composée de *coliformes totaux* 2,6. 10^2 UFC/100ml, de *coliformes fécaux* 10^3 UFC/100ml et *d'Escherichia coli* 3.10^2 UFC/100ml dans les eaux de la rivière. L'analyse de redondance faite sur les paramètres biotiques et abiotiques a permis de déceler que la température, l'oxygène dissous, les nutriments et les matières organiques influencent la distribution de la flore bactérienne. La pollution enregistrée dans cette étude trouve origine dans les activités anthropiques notamment l'agriculture et les rejets divers d'origine ménagers. L'analyse bactériologique a montré que ces eaux sont contaminées par des germes susceptibles de causer des maladies diarrhéiques notamment les coliformes fécaux et les Escherichia coli. D'où un traitement particulier avant tout usage pour des fins domestiques s'avère nécessaire. Il est bon de mener des études similaires dans d'autres écosystèmes afin de protéger la population contre la pollution et les maladies diarrhéiques.

Mots clés : Nyakagunda, Pollution, physico-chimique, bactériologique, Protection.

ABSTRACT

A study on the Nyakagunda River located in Cibitoke Province has been initiated. The objective was to evaluate the physicochemical and microbiological quality of its waters with a view to protecting this resource and warning the surrounding population against health risks. Water samples were collected once a month from 10 a.m. to 2 p.m. over a period of 8 months from March to October 2022. Physico-chemical parameters such as temperature, pH, total dissolved solids, electrical conductivity, dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, chemical oxygen demand, nitrites, nitrates, phosphates as well as bacteriological parameters such as *fecal coliforms* of 10^3 UFC/100ml , 2,6. 10^2 UFC/100ml of *total coliforms* and 3.10^2 UFC/100ml of *Escherichia coli* were also analyzed during this same period. Standard analysis methods such as AFNOR and APHA were used to achieve this objective. The results of this study showed that the parameters analyzed varied from upstream to downstream and over time. For phosphate ions we found an unusual concentration in the months of June and August: 0.31 mg/l and 0.362 mg/l respectively. The low concentration of dissolved oxygen (less than 8 mg O2/l) tells us about the organic pollution of this river. Likewise, we found the presence of bacterial flora composed of total coliforms, fecal coliforms and Escherichia coli in the river waters. The redundancy analysis carried out on the biotic and abiotic parameters made it possible to detect that temperature, dissolved oxygen, nutrients and organic matter influence the distribution of the bacterial flora. The pollution recorded in this study finds its origin in anthropogenic activities, particularly agriculture and various discharges of household origin. Bacteriological analysis showed that this water is contaminated by germs likely to cause diarrheal diseases, notably fecal coliforms and Escherichia coli. Hence special treatment before any use for domestic purposes is necessary. It is good to carry out similar studies in other ecosystems in order to protect the population against pollution and diarrheal diseases.

Keywords: Nyakagunda, Pollution, physico-chemical, bacteriological, protection

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY ..... **i**
DEDICACES ..... **ii**
REMERCIEMENTS ..... **iii**
RESUME ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TABLE DES MATIERES ..... **vi**
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES ..... **viii**
SIGLES ET ABREVIATIONS ..... **ix**
AVANT-PROPOS ..... **x**
0. INTRODUCTION GENERALE **1**
0.1. Problématique et objectifs 2
0.2. Hypothèse de recherche 3
0.3. Limites de l'étude 3
0.4. Architecture du travail 3
CHAPITRE I: GENERALITES **4**
I.1. Réseau hydrographique du Burundi 4
I.1.1. Climat du Burundi 5
I.1.2. Cycle de l'eau 6
I.1.3. Evapotranspiration 6
I.1.4. Précipitations 6
I.1.5. Ruissellement 6
I.1.6. Infiltration 6
I.1.7. Importance de l'eau dans la vie quotidienne 6
I.1.8. Accès et approvisionnement en eau potable au Burundi 7
I.2. Paramètres de contrôle de qualité de l'eau 8
I.2.1. Potentiel d'hydrogène. 8
I.2.2.Température 8
I.2.3. Conductivité électrique 9
I.2.4. Solides totaux dissous 9
I.2.5. Oxygène dissous 10
I.2.6. Demande Biochimique en Oxygène 10

I.2.7. Demande Chimique en Oxygène 11
I.2.8. Nitrates 11
I.2.9. Nitrites 11
I.2.10. Phosphates 11
I.3. Normes des eaux de consommation 12
I.3.1. Normes physico-chimiques de qualité de l'eau de surface 12
I.4. Paramètres bactériologiques 14
I.4.1. Coliformes 14
I.4.2. Coliformes totaux 15
I.4.3. Coliformes fécaux 15
I.4.4. Escherichia coli 15
I.4.5. Impact de la pollution bactérienne sur la santé humaine 16
CHAPITRE II. MATÉRIEL ET MÉTHODES 17
II.1. Présentation de la zone d'étude 17
II.1.1. Choix et description de la zone d'étude 17
II.1.2. Localisation géographique de la rivière Nyakagunda 17
II.1.3. Description des stations d'échantillonnage 17
II.1.4. Activités économiques dans la zone d'étude 19
II.2. Matériels 19
II.3. Echantillonnage et conservation des échantillons 20
II.4. Mesure des paramètres physico-chimiques au laboratoire 21
II.5. Détermination et mesures des paramètres bactériologiques 24
II.6. Analyse des résultats 25
CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS. 26
III.1. Présentation des résultats 26
III. 2. Discussion des résultats 33
CONCLUSION 38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 39

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableaux

Tableau 1 : Ressources en eau renouvelables internes 5
Tableau 2 : Concentration maximale admissible dans l'eau destinée à la consommation humaine 12
Tableau 3 : Normes de qualité de base pour les eaux de surface ordinaires (AR du 4/11/1987) 13
Tableau 4: Variation temporelle des paramètres physico-chimiques 27
Tableau 5 : Variation spatiale des paramètres physico-chimiques de la rivière 29
Tableau 6: Variation temporelle des paramètres bactériologiques 31
Tableau 7 : Variation spatiale des paramètres bactériologiques 32

Figures

Figure 1: Carte illustrant la zone d'étude et les stations d'échantillonnage 18
Figure 2 : Variation des paramètres physico-chimiques de la rivière Nyakagunda 29
Figure 3 : Analyse de redondance de l'influence des paramètres physico-chimiques sur la distribution de la flore bactérienne. 33

SIGLES ET ABREVIATIONS

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

UNICEF : United Nations International Children's Emergency Fund

DINEPA : Direction Nationale de l'Eau Potable et de l'Assainissement

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

BBN : Bureau Burundais de Normalisation

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

UFC : Unité formatrice de colonies

GPS : Global Positionning System

WHO : Word Health Organization

AFNOR : Association Française de Normalisation

APHA : American Public Health Association

AVANT-PROPOS

Sciences et Gestions Integrée de l'environnement spécialité Eau et Assainissement à l'Université du Burundi. L'analyse consiste à déterminer la qualité Physico-chimique et bactériologique des eaux de la rivière Nyakagunda.

Nous avons effectué cette étude à partir des faits constatés dans la zone de Rugombo ou il 'y a des maladies liées aux mains sales qui se répètent presque chaque année et cela handicape le développement de la population de cette zone.

En effet, les facteurs physico-chimiques et bactériologiques des eaux donnent des renseignements sur la qualité de ces dernières. La mauvaise qualité de l'eau peut être l'origine des maladies diarrhéiques pour la population qui par manque d'eau de robinet utilise l'eau de la rivière Nyakagunda.

0. INTRODUCTION GENERALE

L'eau est indispensable à la vie. Elle est une ressource dont la disponibilité a toujours guidé le développement de diverses formes de la vie sur la terre (Tampo, et al. 2015). Elle a également conditionné et conditionne encore dans une large mesure la présence et les activités humaines. La poussée démographique s'accompagne aujourd'hui d'une augmentation de la consommation d'eau. Ce qui suscite l'apparition de problèmes liés à la disponibilité ou à la qualité de cette ressource. Ainsi, pour assurer sa pérennité et sa bonne gestion pour un développement durable, il est préférable de faire un suivi permanent de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux (Kadjangaba, et al. 2018). L'eau existe sous différentes formes pour répondre aux besoins biologiques, domestiques et agricoles. Elle est sans doute la ressource qui définit les limites du développement durable et n'a pas de substrat (Maurel, et al. 2006). L'importance de l'eau dans l'économie humaine ne cesse de croître et son approvisionnement devient de plus en plus difficile. D'où nécessité d'utiliser des techniques industrielles modernes. Sous la pression des besoins considérables de la civilisation moderne on est passé de l'emploi des eaux de sources et des nappes vers l'utilisation des eaux de surface après traitement (Habila, et al. 2008).

La dégradation de la qualité de l'eau peut résulter soit de phénomènes de pollution, soit parfois des phénomènes naturels (Maurel, et al. 2006). Les écosystèmes aquatiques sont souvent victimes de pollution chimiques et microbiologique du fait qu'ils sont exposés à de nombreuses contaminations. Ce qui engendre des perturbations graves des différents compartiments qui les constituent et par conséquent ont une influence considérable sur la santé humaine (Amira, et al. 2008). La qualité physico-chimique et microbiologique des rivières est dégradée du fait que l'eau est un récepteur final des polluants issus des activités humaines (industrie, agriculture, élevage, les rejets domestiques…etc.). Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants (Fotos, et al. 2011). Une mesure d'hygiène s'impose et le contrôle de ces milieux récepteurs doit être obligatoire. Elle est facilitée par la recherche d'indices de contamination qui sont souvent fidèles et de bons indicateurs de la qualité de ces eaux (Amira, et al. 2008).

La surveillance de l'eau joue un rôle important dans la santé publique car celle-ci est susceptible d'engendrer des altérations catastrophiques sur le sol et sur l'organisme humain.

C'est dans ce contexte que cette étude est initiée pour mettre en place une base de données sur la physico-chimie et la pollution microbiologique d'une rivière située au nord-ouest du Burundi.

0.1. Problématique et objectifs

Au Burundi l'accès à l'eau potable est limité. La Commune Rugombo connait des problèmes liés au manque d'eau potable suite aux pannes répétitives surtout pendant la période sèche. Vue l'emplacement de la rivière, l'eau de cette dernière est souvent utilisée par la population de la localité dans leur vie quotidienne pendant la saison sèche où on observe une carence d'eau. La population de cette localité fait recours à la rivière Nyakagunda se trouvant près du centre pour des fins domestiques. Elle s'en sert pour préparer le jus /vin de banane, la lessive, préparer la nourriture et même pour la boisson. Il en résulte des maladies des mains sales qui s'observent fréquemment pendant la période sèche. Ces maladies d'origine hydrique comme le choléra sont dues aux bactéries et microorganismes nuisibles à la santé. Elles handicapent non seulement la santé de la population mais aussi le développement communautaire. Cette étude a comme objectifs:

• Objectif général

L'objectif général de cette étude était d'évaluer la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la rivière Nyakagunda en vue de la gestion de cette ressource et prévenir la population environnante contre les risques sanitaires.

• Objectifs spécifiques

- Déterminer certains paramètres physico-chimiques des eaux de la rivière Nyakagunda,
- Evaluer la pollution bactériologique des eaux de la rivière Nyakagunda,
- Déterminer l'influence de la qualité physico-chimique sur la distribution de la flore bactérienne dans la rivière Nyakagunda.

0.2. Hypothèse de recherche

Les eaux de la rivière Nyakagunda contiennent des substances chimiques à fortes doses et par des germes microbiens pathogènes a l'origine des maladies diarrhéiques.

0.3. Limites de l'étude

Pour l'analyse de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau, nous nous sommes limités d'une part au manque de matériel que l'Université du Burundi ne dispose pas, d'autre part, les moyens financiers ne nous ont pas permis de faire les analyses tels que les métaux lourds parce que la rivière traverse la zone minière.

0.4. Architecture du travail

Hormis l'introduction générale, ce travail de fin d'études est articulé sur trois chapitres. Le premier porte sur la revue de la littéraire sur les eaux de surface. Il expose de façon succincte les eaux destinées à la consommation humaine, son importance pour la santé publique, son accès et son approvisionnement au service de la communauté burundaise. Dans un second temps, il aborde les principaux paramètres de contrôle de qualité de l'eau et indicateurs de la pollution environnementale. Le deuxième chapitre expose le matériel et la méthodologie qui nous a permis d'atteindre les objectifs fixés. Le troisième chapitre consiste à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. Enfin, une conclusion générale et les références bibliographiques viennent clore ce travail.

CHAPITRE I: GENERALITES

L'eau est un élément indispensable à la vie des êtres vivants et surtout à celle de l'homme. Elle est certainement la substance qui nous est le plus familière. Source et milieu de vie, solvant de lavage et de transport de minéraux, régulateur thermique, l'eau possède des propriétés remarquables et essentielles à tous les êtres vivants et au maintien des propriétés environnementales de la planète Terre (Ngô et Régent, 2004).

I.1. Réseau hydrographique du Burundi

D'une manière générale, le Burundi est doté d'un réseau hydrographique très dense, notamment dans les plateaux centraux où il existe de nombreuses vallées à fond plat souvent mal drainées et traversées par des rivières. Le Burundi appartient à deux bassins hydrographiques, à savoir le bassin du Nil avec une superficie de 13.800 km2 et le bassin du fleuve Congo avec une superficie de 14.034 km2 (Sinarinzi, et al. 2022). Dans la plupart des régions du Burundi, il existe un réseau dense de cours d'eau permanents et de nombreux axes de drainage. Le Burundi est très riche en lacs naturels, à savoir les lacs Tanganyika, Cohoha, Rweru, Rwihinda, Gacamirindi, Kanzigin, Gitamo, Rwungere, Narungazi, Inampete, Dogodogo, et en lacs de retenue (Kavuruga et Rwegura). Toutes les ressources en eau du pays proviennent des précipitations dont la plus grande quantité (77 %) tombe entre les mois de novembre et avril.

Ces eaux de pluies alimentent les cours d'eau dont le réseau est dense dans la plupart des régions, à l'exception des plaines de l'Imbo, du Bugesera et d'une partie du Moso. Celles-ci ont peu de sources mais elles sont traversées par des rivières provenant des régions d'altitude où les précipitations sont plus abondantes. En moyenne, les ressources en eau disponibles sur le territoire national sont estimées à 319 m3/s ou 10.060 km3/an. Le débit des cours d'eau frontaliers s'élève à 336 m3/s ou 10.596 km3/an (Sinarinzi, et al. 2022).

La seule rivière qui importe de l'eau dans le territoire burundais est la rivière Kaburantwa dont le débit s'élève à 4 m3/s ou 0.126 km3/an. La quantité d'eau disponible à l'intérieur du pays est donnée dans le Tableau (1). Le débit moyen des cours d'eau (10.06 km3/an) représente les ressources en eaux superficielles et en eaux souterraines. Il s'agit de la totalité des ressources en eaux internes renouvelables disponibles. Le débit de base est alimenté par le drainage des nappes d'eau souterraines (FAO, 2005).

Tableau 1 : Ressources en eau renouvelables internes

Bassin	Superficie	Débit moyen			Débit de base			Débit garanti sur 95%		
	Km^2	Km^3/an	m^3/S	$1/s*Km^2$	Km^3/an	m^3/S	$1/s* Km^2$	Km^3/an	m^3/S	$l/s* Km^2$
Nil	13218	4.32	137	1O.4	3.09	98	7.4	2.08	66	5.0
Congo	11817	5.73	182	15.4	4.38	139	11.8	2.87	91	7.7
Total	25035	10.06	319	12.7	7.47	237	9.5	4.95	157	6.3

Source : Rapport FAO, (2005).

Pour une année, le débit de base estimé s'élève à 237 m^3/s ou 7.47 km^3/an, soit septante quatre pourcent (74%) de l'écoulement total. Dans les différents bassins, les débits de base observés oscillent entre 63 et 89 pour cent du débit moyen, en fonction de la capacité de rétention du bassin versant qui dépend notamment de la capacité des aquifères (volume de stockage) et des alluvions des vallées, y compris les marais (PNUD, 2018).

I.1.1. Climat du Burundi

La topographie du Burundi s'accompagne d'une variation du climat en fonction d'altitude d'où une diversité climatique importante. Le climat du Burundi est tropical humide influencé par l'altitude qui varie entre 773m et 2670m (Iradukunda, 2021). Il est caractérisé par une alternance de la période pluvieuse qui s'étend généralement du mois d'octobre à mai et de la période sèche qui va de juin à septembre. D'une manière générale, les précipitations moyennes augmentent avec l'altitude. Les minimas sont de l'ordre de 500mm/an et s'observent dans la plaine de la Ruzizi, alors que les maximas atteignent 2200mm/an dans les régions de hautes altitudes. La pluviométrie moyenne pour le Burundi est de 1274mm/an de pluie. C'est au cours du mois d'avril qu'on observe le plus grand nombre de jours de pluie (16 à 26) (Centre d'échange d'information du Burundi, 2012). La température moyenne annuelle de l'air diminue au fur et à mesure que l'altitude augmente. La moyenne annuelle la plus élevée est de 24,1°C (plaine de l'Imbo) tandis que la plus faible est de 15 ,6°C (Rwegura).

Les moyennes mensuelles des températures maximales sont les plus élevées en fin de période sèche (Septembre-octobre) alors que les moyennes mensuelles des températures minimales sont les plus faibles pendant la période sèche (Stefan et al. 2014).

I.1.2. Cycle de l'eau

Toute eau vient des océans et y retourne tôt ou tard, par un cycle hydrologique continu (Duvignaud, 1980). Son cycle naturel est en perpétuel mouvement. Il implique toutes les composantes de la synthèse climatique globale, l'atmosphère, les océans, les terres immergées et la biosphère continentale (Drissi, et al. 2008). L'eau sous ses différents états (physique, gazeux, liquide, solide) suit un vaste cycle dans la nature.

I.1.3. Evapotranspiration

C'est la somme des pertes par transformation de l'eau en vapeur (Boeglin, et al. 2006). Sous l'action du soleil, l'eau de mers, des lacs et des rivières s'évaporent. Les végétaux transpirent et rejettent eux aussi de la vapeur d'eau (Drissi, et al. 2008).

I.1.4. Précipitations

La vapeur d'eau atmosphérique se condense en nuages qui engendrent des précipitations sous forme de pluies, de neige ou de grêles. Les précipitations qui constituent l'origine de presque toutes nos réserves en eau douce, sont variables d'une région à l'autre suivant le climat et le relief qui sont des facteurs essentiels (Boeglin, et al. 2006).

I.1.5. Ruissellement

Parvenue sur le sol, une partie des précipitations s'écoule à la surface vers le réseau hydrographique et les étendues d'eau libre (lacs, mers), c'est le ruissellement de surface (Boeglin, et al. 2006).

I.1.6. Infiltration

Une partie des précipitations pénètre dans le sol et le sous-sol (Boeglin et al. 2006). L'infiltration joue un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres puisqu'elle permet la réhydratation des sols. Elle assure aussi l'alimentation des nappes phréatiques et des rivières souterraines (Geny, et al, 1992).

I.1.7. Importance de l'eau dans la vie quotidienne

Elle est indispensable à la régulation du climat, au développement de la vie sur terre, au maintien des écosystèmes et aux populations. Elle intervient pour le développement de l'agriculture, de l'industrie et aussi pour la production de l'énergie (Agate, et al. 2017). Elle joue un rôle très important dans le développement socio-économique aussi bien au niveau

local, régional qu'international. Ainsi, les ressources en eau constituent une préoccupation majeure dans les pays à climats arides ou semi-arides comme elles sont absolument essentielles pour le développement des activités humaines, économiques et sociales (Abdelghani, et al. 2020). Sans l'eau, la vie sur terre n'aurait jamais existé, donc c'est un élément noble qu'on doit protéger pour les générations futures. L'eau est le principal composant du corps humain car elle représente environ les 2/3 du poids corporel. Pour un adulte de 80 kg, son corps renferme 50 à 60 litres d'eau (Orelien, et al. 2017). L'eau facilite tous les échanges nutritifs à l'intérieur des cellules et aussi entre les cellules présentes dans nos différents organes. Les influx nerveux ont besoin d'un milieu aqueux pour que les échanges d'ions et de particules électriques puissent avoir lieu (Emmanuel, et al. 2002). Pour un développement socio-économique durable d'un pays ou d'une région, il importe que tout gouvernant affecte inévitablement les ressources suffisantes afin de réduire la pollution domestique et industrielle puisque la consommation de cette denrée augmente de façon vertigineuse (Kettab, et al., 2008). Il est largement admis que la mise en place d'un développement durable exige de mettre en équation des préoccupations environnementales en tenant compte du facteur essentiel et limite qui est l'eau.

I.1.8. Accès et approvisionnement en eau potable au Burundi

L'accès à l'eau potable demeure une condition indispensable à la santé de l'homme car c'est un droit humain élémentaire et composante-clé des politiques efficaces de la protection sanitaire.

L'accès à l'eau est défini comme « la possibilité de disposer, par personne et par jour, d'au moins 20 litres d'eau provenant d'une source située à moins d'un kilomètre du lieu de résidence de l'utilisateur » (OMS/UNICEF, 2000).

L'analyse quantitative de l'approvisionnement en eau potable estime que les besoins domestiques minimaux pour mener une vie saine doivent être de 100litres environ par jour, soit 36.5 m3 d'eau/an (Falkenmark et Widstrand, 1992). En matière d'approvisionnement en eau et assainissement de base, le taux de couverture en eau potable en milieu urbain s'est amélioré sensiblement passant de 75% à 83% entre 2010 et 2013 (soit une augmentation de 8 pour cent). Quant au milieu rural, le taux de couverture en eau potable a connu une légère régression suite à la croissance démographique plus rapide que celle des infrastructures, passant de 63% en 2010 à 60% en 2013 (soit une baisse de 3 pour cent).

En ce qui concerne l'assainissement de base, seuls 27% et 15% respectivement de la population urbaine et rurale ont accès à des installations sanitaires adéquates et 16% au niveau national (INEA, 2012; ENHAB, 2014).

I.2. Paramètres de contrôle de qualité de l'eau

La qualité physico-chimique de l'eau donne une information sur la localisation et l'évaluation d'un niveau de pollution, en fonction de différents paramètres. A base des valeurs de références, elle s'apprécie à l'aide de plusieurs paramètres (Rodier, 2009).

I.2.1. Potentiel d'hydrogène.

Le potentiel d'hydrogène noté pH mesure l'activité chimique des ions hydrogènes en solution. En général, il est sans effet direct sur les consommateurs (WHO, 2011). Cependant, il fait partie des paramètres essentiels de contrôle de qualité de l'eau. Car, il conditionne un large éventail d'équilibres physico-chimiques entre les gaz dissous (CO2), les ions carbonates et bicarbonates (Belghiti et al. 2013). Le pH des eaux naturelles est principalement imposé par les équilibres des acides carboniques (Rodier, 2009). Il est aussi influencé par la nature du substratum sol, la géologie et l'origine des eaux (Belghiti et al. 2013). Le pH d'une eau est une indication de sa tendance à être acide ou alcaline, il est fonction de l'activité des ions d'hydrogène H+ présents dans cette eau (Allalgua, et al. 2017). Dans les eaux naturelles cette activité est due à des différentes causes en particulier l'ionisation de l'acide carbonique et de ses sels (Rodier, 2009). Les valeurs limites du pH pour l'eau de consommation sont comprises entre 6,5 et 9 (Jora, et al.2011).

Au-dessous de ce seuil l'eau est dite « agressive », elle a un effet corrosif sur les canalisations et peut mener à la dissolution de certains métaux toxiques tels que le plomb des conduites (Savary, et al. 2010). Ce qui a des conséquences néfastes sur la santé humaine.

I.2.2.Température

Il est nécessaire de connaître la température de l'eau avec précision car elle joue un rôle si important dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels et dans la détermination du pH (Bouziani, et al 2007). En plus, cette mesure s'avère aussi utile pour les études limnologiques (Aylward, et al. 2005). Une température élevée permet le développement des micro-organismes et peut par conséquent augmenter le goût, l'odeur et la couleur (OMS, 1994).

Au contraire, une température inférieure à 10°C conduit au ralentissement des réactions chimiques dans les différents traitements des eaux (Rodier, 2009). Elle s'exprime en degré Celsius (°C).

I.2.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm et 2 cm de surface et séparées l'une de l'autre de 1cm (Rodier, 2009). La conductivité électrique mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes, elle permet d'apprécier la qualité des sels dissous dans l'eau et nous donne également une information sur les degrés de minéralisation de l'eau (Guentri et Rahmania, 2015). L'expression de la conductivité électrique est le micro Siemens par centimètre (µS/cm) (AFNOR, 2001). Elle dépend des charges de matières organiques endogènes et exogènes, génératrices de sels après décomposition et minéralisation. Elle augmente également avec le phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau. Elle varie aussi suivant le substrat géologique traversé (Belghiti, et al. 2013). La limite de référence de la conductivité électrique mesurée à 25 °C pour une eau potable se fixe à 1200 µS/cm (OMS, 2000).

I.2.4. Solides totaux dissous

Dans l'eau potable, la détermination des solides totaux dissous (TDS) n'a pas de base fondée sur la santé. La présence de ces solides favorise la corrosion et l'incrustation. A teneur élevée, ils entrainent un goût désagréable à l'eau et par conséquent ils deviennent répréhensibles pour les consommateurs. Sur base de ce paramètre, une eau est dite de bonne qualité quand sa teneur en TDS est inférieure à 600mg/l (WHO, 2011).

Par définition, les matières en suspension sont retenues sur le dessus du filtre, et les solides dissous passent à travers le filtre avec de l'eau. Lorsque la partie filtrée de l'échantillon d'eau est placée dans une coupelle, puis évaporée, les solides dissous dans l'eau restent comme résidu dans la capsule d'évaporation. Cette matière est appelée matières totales dissoutes (Spellman, et Bieber, 2010).

I.2.5. Oxygène dissous

L'oxygène dissous (O2) est très important car il conditionne l'état de plusieurs sels minéraux, la dégradation de la matière organique et la vie des animaux aquatiques (Mharzi, et al. 2015). Il joue un rôle primordial dans le maintien de la vie aquatique et dans l'autoépuration. Sa présence dans les eaux naturelles est déterminée principalement par la respiration des organismes, par l'activité photosynthétique de la flore, par l'oxydation et la dégradation des polluants et enfin par les échanges air-eau.

I.2.6. Demande Biochimique en Oxygène

La Demande Biochimique en Oxygène (DBO) est un paramètre global permettant d'apprécier la qualité des eaux douces et résiduaires. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire aux bactéries hétérotrophes pour oxyder la matière organique biodégradable (Jouanneau, et al. 2014). A ce titre, elle est comparable à d'autres paramètres tels que la demande chimique en oxygène (DCO) ou les matières en suspension (Henz, et al. 2008). Plus particulièrement, la DBO reflète le degré de pollution des eaux par les matières organiques biodégradables (MOB).

Toutefois, si l'apport de MOB est excessif, l'oxygène dissous se maintient à des niveaux de concentration faibles. Cette asphyxie du milieu conduit à des modifications significatives de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La capacité d'autoépuration des milieux en est altérée rendant l'eau impropre à la consommation et aux activités humaines (Harrison, et al. 2001). Le choix des conditions de mesure (durée et température d'incubation) périodes plus courtes (2 jours) ou plus longues (7 jours), de même que des températures plus faibles (15 °C) ou plus élevées (27 °C), furent proposées, soit pour plus de représentativité de l'analyse, soit pour des raisons pratiques de mise en œuvre de la méthode au sein des laboratoires. Toutefois, même si la température d'incubation a été standardisée à 20 °C depuis, la durée du test est restée de 5 jours ; il s'agit, dans ces conditions, du paramètre DBO5 (Harrison, et al. 2001).

I.2.7. Demande Chimique en Oxygène

La Demande Chimique en Oxygène est un indicateur de la matière organique totale tandis que la DBO5 renseigne sur la fraction organique biodégradable (HENZE, et al. 2000). La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène dissous qui doit être présente dans l'eau pour oxyder les matières organiques chimiques. La DCO est utilisée pour évaluer l'impact à court terme des effluents des eaux.

I.2.8. Nitrates

Les nitrates constituent le stade final d'oxydation de l'azote organique. Dans la nature, les nitrates sont solubles dans l'eau, en faible concentration principalement dans les eaux souterraines et superficielles. Ils sont utilisés pour la fabrication des explosifs, dans l'industrie chimique comme oxydant, et comme conservateur dans les denrées alimentaires (Savary, et al. 2010). Dans les eaux de surface, les nitrates proviennent des rejets de stations d'épuration ou plus simplement de latrines et fosses septiques contenant des matières organiques (Demdoum, et al. 2010).

I.2.9. Nitrites

Les nitrites peuvent être rencontrés dans les eaux, mais généralement à des doses faibles, une eau qui renferme des nitrites peut être considérée comme suspecte. Il est important de signaler que les eaux en contact avec certains terrains peuvent contenir des nitrites et on les trouve également dans les eaux pauvres en oxygène. Les nitrites (NO_2-) et les nitrates (NO_3-), sont toxiques pour les êtres vivants, et la pollution de l'eau par ces éléments d'origine chimique peut favoriser la propagation de maladies graves telles que les irritations, les allergies, l'avortement, les cancers et les intoxications chimiques (Hassoune, et al. 2006).

I.2.10. Phosphates

Les phosphates font partie des anions assimilables par le corps de l'être humain (Rodier, 1984). Quel que soit leur origine (domestique, industrielle ou agricole), leur présence dans les eaux à fortes concentration (teneurs supérieures à 0,3 mg/l) favorise le développement massive d'algues, lesquelles conduisent à l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau (Potelon et Zysman, 1998).

A doses élevées, les sels de phosphates peuvent inhiber l'utilisation des sels de calcium et engendrer des nausées, diarrhées, hémorragies gastro-intestinales, ulcération, atteintes rénales et hépatiques (Potelon et Zysman, 1998).

I.3. Normes des eaux de consommation

Une norme est un critère de référence établi conformément à une réglementation ou une référence minimale, moyenne ou supérieure. Elle permet de comparer une valeur par rapport à une autre valeur seuil et de définir des conditions acceptables par rapport à celle qui ne le serait pas (Hoffman, et al. 2014). Au Burundi, il existe des réglementations locales pour la qualité de l'eau de boisson comme celles du Bureau Burundais de Normalisation et de contrôle de qualité (BBN) qui représentent les différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques de la qualité de l'eau de consommation humaine avec des valeurs limites.

Tableau 2 : Concentration maximale admissible dans l'eau destinée à la consommation humaine

Paramètres	*Unités*	*Normes d'eau de consommation*
Température	^{0}C	25 à 28
Potentiel d'hydrogène	-	6,5 à 9
Conductivité électrique	µS/cm	400 - 1000
Solides dissous totaux	mg/l	≤600
Demande Biochimique en Oxygène	mgO2/l	≤6
Demande Chimique en Oxygène	mgO2/l	-
Oxygène dissous	mgO2/l	≥3
Nitrites	mg/l	≤ 3
Nitrates	mg/l	≤ 50
Phosphates	mg/l	≤ 0,2
Coliformes fécaux	UFC/100ml	0
Coliformes totaux	UFC/100ml	0
Escherichia Coli	UFC/100ml	0

I.3.1. Normes physico-chimiques de qualité de l'eau de surface

Les normes d'eau de surface sont des normes de qualité environnementale qui fixent des limites pour la présence de certaines substances ou groupes de substances dans les eaux de surface, telles que les rivières, les lacs et les océans.

Les varient selon les pays et les régions, mais elles sont généralement établies pour protéger la santé humaine et l'environnement (Hoffmann, et al. 2014). Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé les normes de la Belgique se trouvant dans l'Arrêt Royal du 4 novembre 1987.

Tableau 3 : Normes de qualité de base pour les eaux de surface ordinaires (AR du 4/11/1987)

Paramètres	Unités	Valeur
pH		6 à 9
Accroissement de t° après mélange	°C	3
Température	°C	25
Oxygène dissous	% saturation	50
D.B.O	mg/l	6
Azote ammoniacal N-NH_4^+	mg/l N	2
Phosphore total	mg/l P	1
Chlorures	mg/l Cl	250
Sulfates	mg/l SO4	150
Hydrocarbures aromatiques polycycliques	ng/l (total)	100
fluoranthène		
benzo(b)fluoranthène		
benzo(k)fluoranthène		
benzo(a)pyrène		
benzo(ghi)perylène		
indéno(1,2,3,c,d)pyrène		
Chlorophénols	ng/l (par substance)	100
Substances tensioactives anioniques	mg/l	0,5
Substances tensioactives non-ioniques	mg/l	0,5
Pesticides organochlorés		
Pesticides organochlorés totaux	ng/l	30
Pesticides organochlorés par substance	ng/l	10
Polychlorobiphényls (PCB)	ng/l	7
Inhibiteurs de cholinestérase**	µg/l	0,5
Cadmium total	mg/l Cd	0,001*
Chrome total	mg/l Cr	0,05
Plomb total	mg/l Pb	0,05
Mercure total	mg/l Hg	0,0005*
Zinc	mg/l Zn	0,3
Cuivre total	mg/l Cu	0,05
Nickel total	mg/l Ni	0,05
Arsenic	mg/l As	0,05
Cyanures totaux	mg/l CN	0,05
Azote Kjeldahl	mg/l N	6
Hydrocarbures aromatiques monocycliques	µg/l	2

** Pour le cadmium et le mercure, la norme de l'AR a été remplacée par celle reprise dans la directive 76/464/CEE sur les substances dangereuses (voir ci-dessous)*

***La cholinestérase est une enzyme intervenant dans la transmission de l'influx nerveux. Les pesticides organophosphorés sont des inhibiteurs de cholinestérase.*

I.4. Paramètres bactériologiques

Dans la nature, les bactéries se retrouvent dans tous les milieux (eau, air, sol et même dans et sur les êtres vivants). Elles sont des espèces innombrables qui jouent dans la biosphère un rôle géochimique majeur (Ngô et Régent, 2004). Elles occupent toutes les niches écologiques et interviennent dans le recyclage des éléments (carbone, oxygène, azote, soufre, etc.), dans la minéralisation de la matière organique (hétérotrophes), dans l'assimilation des éléments minéraux (autotrophes, photosynthèse).

Avec l'air et le sol, les eaux font donc partie des éléments qui servent soit de lieu d'hébergement pour les espèces autochtones, soit de canal pour véhiculer les bactéries en transit éliminées par l'homme, les animaux et les plantes (Rodier, 2009). La contamination bactérienne des eaux de surface est un problème de pollution qui remonte très loin dans le temps.

De nos jours la qualité des eaux est altérée notamment par la contamination par des microorganismes d'origine fécale, l'utilisation excessive des produits chimiques, les rejets incontrôlés des industries et les déchets solides et liquide provenant des ménages (Hounsou, et al. 2010). Les fèces humaines ou animales sont donc une importante source de pollution à cause de leur charge microbienne (bactéries, virus, protozoaires et d'helminthes pathogènes) (OMS, 2004).

I.4.1. Coliformes

Il n'y a pas une définition microbiologique stricte du terme « coliforme » (Rodier, 2009). Un certain nombre d'espèces bactériennes partageant certaines caractéristiques biochimiques appartenant à la famille des *Enterobacteriaceae* se regroupant sous ce terme. L'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) définit les coliformes comme étant des organismes en formes des bâtonnets, non sporogènes, à Gram négatifs, oxydase négatif, anaérobies facultatifs. Ils sont capables de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaires. Ils sont aussi 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. Le dénombrement de ces organismes à 35-37 °C est souvent désigné sous l'expression de dénombrement des *coliformes totaux* (Rodier, C., 2009).

I.4.2. Coliformes totaux

Les *coliformes totaux* sont des bactéries en forme de bacilles, non sporulantes, Gram négatif, aérobies facultatifs et qui fermentent le lactose en 48 heures à 35 °C avec production de gaz. Les coliformes totaux ne sont pas nécessairement des bactéries originaires du système intestinal. Plusieurs bactéries faisant du groupe des coliformes totaux peuvent se retrouver sur les feuilles des arbres ou sur toute autre forme de végétation. Leur présence dans l'échantillon ne signifie pas exclusivement que l'on est devant une contamination d'origine fécale (Niyoyitungiye et al., 2020).

I.4.3. Coliformes fécaux

Les *coliformes fécaux* sont des bactéries que l'on retrouve dans la flore intestinale des animaux à sang chaud. Les coliformes fécaux sont en fait des coliformes qui résistent à des températures plus élevées, soit à partir de 44,5°C. La bactérie *Escherichia coli* (*E. coli)* fait partie des coliformes fécaux. Une fois présents dans une source d'eau, la situation devient anormale et peut donc nous renseigner sur la dégradation de la qualité bactériologique de l'eau due à la contamination fécale .Ils sont transportés surtout par ruissellement des eaux des pluies au niveau du bassin versant et de là, les microorganismes contenus dans la terre sont entrainés (Niyoyitungiye, et al. 2020).

I.4.4. Escherichia coli

Cette bactérie est caractérisée par les enzymes α-galactonidase et β-glucoronidase, et correspond à des coliformes thermo-tolérants qui produisent de l'indole à partir du tryptophane (Emmanuel, 2003). Il est abondant dans les fèces humaines et animales jusqu'à des concentrations de 109 UFC par gramme de matières sèches (Orelien, 2017). Il est également retrouvé dans les eaux d'égout, les effluents traités, ainsi que dans toutes les eaux naturelles et les sols victimes d'une contamination fécale récente (Emmanuel, 2002). Cette bactérie est indicatrice de la contamination par les matières fécales pouvant contenir des agents pathogènes, comme des virus ou des parasites (Haissoufi et al. 2011).

I.4.5. Impact de la pollution bactérienne sur la santé humaine

Les risques à court terme de la pollution de l'eau par les bactéries proviennent d'une ingestion en trop grande quantité d'eau contaminée, comme le précise l'Organisation mondiale de la santé, la contamination de l'eau peut provoquer de nombreuses maladies et troubles comme la diarrhée (Mondesir, et al. 2018). A long terme, lorsque la pollution y est exposée sur de longues périodes, peut également être responsable de l'apparition de maladies chroniques, de la perturbation du fonctionnement normal d'un organe (WHO, 2011). Les microorganismes de pollution fécale des eaux sont des bactéries susceptibles de provoquer des troubles gastro-intestinaux chez les humains *(entéropathogènes, salmonelles, shigelles, E. coli,..*) (Matallah-Boutiba, et al. 2011). Ces pollutions peuvent entraîner divers types de nuisances comme l'augmentation de la mortalité chez les humains, altération des capacités physiologiques, détérioration de la qualité de l'eau au point de la rendre impropre à certains usages, comme l'alimentation humaine (Mondesir, et al. 2018).

La contamination de l'eau potable par diverses bactéries peut être à l'origine de maladies pouvant être mortelles. L'OMS a d'ailleurs annoncé que l'eau potable insalubre, le manque d'assainissement et d'hygiène sont responsables de près de 829 000 décès dans le Monde, dont 485 000 liés à des maladies diarrhéiques. D'autres pathologies comme le choléra, la poliomyélite ou encore la fièvre typhoïde sont aussi provoquées par la contamination de l'eau (Benajiba, et al. 2013).

CHAPITRE II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

II.1. Présentation de la zone d'étude

II.1.1. Choix et description de la zone d'étude

La rivière Nyakagunda traverse les communes à agglomérations importantes et sur lesquelles beaucoup d'activités agro pastorales sont effectuées. En plus dans la commune Rugombo, il s'observe souvent des manques d'eau potable et la population fait recours à l'eau des rivières ce qui est à l'origine des maladies des mains sales surtout pendant la période sèche. La rivière Nyakagunda est aussi l'affluent de la rivière Rusizi. Dans cette commune, il y fréquente aussi les populations des deux pays limitrophes qui sont le Rwanda au Nord et République Démocratique du Congo à l'Ouest, c'est la raison pour laquelle l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de ces eaux s'avère nécessaire.

II.1.2. Localisation géographique de la rivière Nyakagunda

La rivière Nyakagunda prend source dans la forêt de la Kibira et traverse les communes Bukinanyana, Mabayi, Mugina et Rugombo avant de se jeter dans la rivière Rusizi. Elle se trouve dans l'hydrologie de la plaine de la Rusizi. Elle est parmi les affluents de de cette dernière qui sont la rivière Ruhwa, rivière Nyakagunda, rivière Nyamagana, rivière Muhira, rivière Kaburantwa, rivière Kagunuzi, rivière Kajeke et rivière Mpanda.

Ce travail s'est borné au niveau des communes Mugina et Rugombo qui abritent les stations d'échantillonnage choisies en fonction de différentes caractéristiques (endroit où les impacts des activités anthropiques sur la rivière sont remarquables).

II.1.3. Description des stations d'échantillonnage

La première station est de coordonnées (Latitude Sud 20 45' 08.11''; Longitude Est 290 05' 51.99''). Cette station d'échantillonnage se trouve au niveau de la commune Mugina, en amont, il y a le marché de Nyeshenza et l'usine de défrichage du café y déverse l'eau après nettoyage du café cerise. En plus; le petit ruisseau situé en aval du marché de Nyeshenza se jette aussi dans la rivière Nyakagunda et transporte des rejets en provenance des ménages environnants. A l'amont de cette station se trouve une terre arable couverte par les plantes pendant la période pluvieuse.

La deuxième station d'échantillonnage de coordonnées (Latitude Sud 20 48' 23.03''; Longitude Est 290 04' 42,03'') se trouve au niveau de la commune Rugombo, en amont duquel se trouve le caniveau qui amène les eaux en provenance du centre de Rugombo. Ce caniveau transporte les rejets de toutes sortes (matières organiques, objets en plastiques et rejets divers) que la population environnante et les passagers y déversent. A 50m environs, il y a un abattoir dont les excréments et le sang des animaux se retrouvent dans la rivière. En plus, la culture des tomates, des oignons et d'autres plantes nécessitant l'usage des pesticides y est intense. A environs 100 m se trouve les plantations du Rugombo farm (Rugofarm).

La troisième station de coordonnées (Latitude Sud 20 49' 20.67''; Longitude Est 290 04' 12,68'') se trouve plus au sud vers l'aval au niveau de la commune Rugombo. Un caniveau y déverse les eaux mélangées avec les restes de la cuisine en provenance d'agglomération de la population du centre. Etant donné que la profondeur des eaux augmente à ce niveau, les enfants y exercent les activités récréatives comme la natation et les mamans en profitent pour y faire la lessive. Ainsi, elle accueille toute sorte de pollution parce qu'on y fasse toutes les activités qui nécessitent l'usage de l'eau.

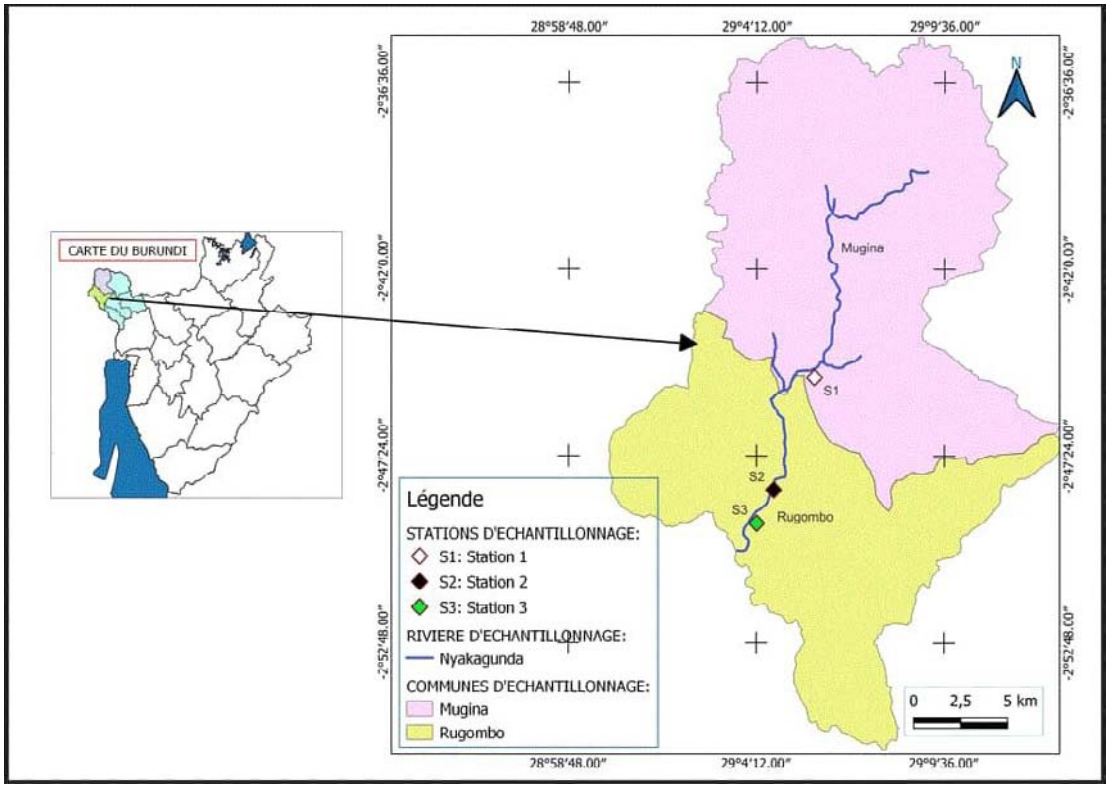


Figure 1: Carte illustrant la zone d'étude et les stations d'échantillonnage

II.1.4. Activités économiques dans la zone d'étude

L'agriculture le commerce et l'élevage sont des activités couramment pratiquées dans la zone d'étude. La population de la zone d'étude trouve leur revenue notamment dans l'agriculture, l'élevage, l'industrie agro-alimentaire, les services et la petite industrie. L'agriculture occupe une place prépondérante dans la vie des Burundais, occupant 90% de la population, même si sa contribution au PIB n'est que de l'ordre de 45% environs. L'agro-industrie a un fort potentiel dans la mesure où elle permet de transformer su place les matières premières périssables, et de créer sous certaines conditions, de la valeur ajoutée dans des secteurs identifiés. L'apport de l'industrie n'est plus à démontrer, elle crée des emplois et contribue à la richesse par les impôts et les taxes collectés au niveau communal et national. La fiscalité représente environ 18% du PIB et ne pourra que bénéficier d'un accroissement de l'activité économique. Les services représentent une alternative valable aux secteurs primaires, d'autant plus qu'ils font appel à la terre (PNUD, 2018

II.2. Matériels

1. Un GPS (Global Positionning System) de marque Garmin etrex, pour la prise des coordonnées géographiques des lieux d'échantillonnages,
2. Des flacons en propylène stériles et en polyéthylène non stériles pour maintenir les échantillons d'eau à analyser,
3. Une glacière pour entreposer les échantillons d'eau afin de les transporter aux laboratoires de chimie et de bactériologie des aliments aux fins d'analyses éventuelles,
4. Une multisonde CONSORT de marque HACH, pour la mesure de la conductivité électrique, de la température de l'eau sur le terrain, des solides totaux dissous et du potentiel d'hydrogène,
5. Une balance d'une capacité d'au moins 2 kg et d'une sensibilité de 0,1 g,
6. Boîtes de Pétri et flacons en verre ou en plastique,
7. Spectrophotomètre ;
8. Pipettes stériles de 1 ml, 5 ml et 10 ml, graduées en unités de 0,1 ml,
9. Flacons de dilution de 160 ml en verre borosilicaté, avec bouchon en caoutchouc ou des bouchons à vis en plastique équipés de liners en Téflon,
10. Fiole jaugée de 5ooml et 1000ml,
11. Bain-marie thermostaté à 55 ± 1°C

12. Bain-marie thermostaté à 55 ± 1°C
13. Compteur de colonies, fond noir avec source lumineuse appropriée et plaque de grille,
14. Autoclave pour stérilisation à 105^0C,
15. Rampe de filtration métallique à plusieurs postes,
16. Robinet d'eau /réseau/pression,
17. Pompe aspirante,
18. Bec bunsen ou autre équipement pour la stérilisation par chaleur sèche (flamme),
19. Pincettes, ciseaux, pinces, pipettes, embouts,
20. Gaz butane,
21. Briquet ou allumette,
22. Incubateurs réglables: un à 36^0C et un autre à 44^0C,
23. Bouteilles de prélèvement,
24. NKS STANDARD pour les germes totaux, livré avec des membranes stérilisées,
25. NKS M-FC pour les coliformes totaux, livré avec des membranes stérilisées,
26. NKS Endo pour les *Escherichia coli*, livrées avec des membranes stérilisées,
27. Eau distillée.

II.3. Echantillonnage et conservation des échantillons

Les échantillons d'eau ont été collectés pendant 8 mois de mars à octobre 2022. Les visites ont eu lieu en date du 15 de chaque mois pour toutes les stations d'échantillonnage. Cependant, le prélèvement a été fait avec beaucoup de soins à une profondeur d'environs 40cm. Pendant l'échantillonnage, il faut d'abord rincer les flacons avec de l'eau à analyser avant leur remplissage. Chaque flacon a été rempli sans matériel intermédiaire et bien bouché de manière à éviter le barbotage et l'emprisonnement d'air à la fermeture. Des flacons en polyéthylène non stériles d'une capacité de 1,5 ml ont été utilisés pour les échantillons d'eau destinés aux analyses physico-chimiques. Tous les échantillons ont été étiquetés et transportés au laboratoire dans une glacière. Les échantillons prélevés ont été gardés dans une enceinte réfrigérée à une température comprise entre 4 à 6 °C (Rodier, 2009).

Pour les échantillons destinés aux analyses microbiologiques, des flacons en propylène stériles de 100 ml chacun ont été utilisés pour chaque échantillon. Ils ont été remplis, étiquetés et placés dans la même glacière.

Ces échantillons ont été transportés aux laboratoires de Chimie de la Faculté des Sciences et dans le Laboratoire de la REGIDESO pour les analyses bactériologiques. Ils ont été analysés avant les 24h.

II.4. Mesure des paramètres physico-chimiques au laboratoire

Les paramètres concernés par l'analyse physico-chimiques sont : le potentiel d'hydrogène, la température, la conductivité électrique, les solides dissous totaux, l'oxygène dissous, la demande biochimique en oxygène DBO_5, demande chimique en oxygène DCO, les nitrites, les nitrates et les phosphates.

Les méthodes d'analyse utilisées pour la détermination et la mesure des paramètres physico-chimiques sont : la méthode de Spectrophotométrie d'Absorption Moléculaire qui consiste à mesurer la densité optique des substances chimiques en fonction de leur longueur d'onde d'absorption a été utilisée pour mesurer les concentrations des nitrates, des nitrites et les phosphates. Elle est une méthode à la fois simple, précise et rapide qui permet de réduire les erreurs qui pourraient être dues aux manipulations (Rodier, 2009).

Dosages des nitrates

- Mode opératoire

- Introduire de l'eau dans une capsule de 60ml (pour les teneurs en Azote nitrique supérieur à 10mg/l, opérer une dilution).
- Alcaliniser faiblement avec la solution de l'hydroxyde de sodium
- Poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage
- Préparer de la même façon un témoin avec 10 ml d'eau desionisée
- Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 415nm et tenir compte de la valeur lue pour le témoin
- Se reporter à la courbe d'étalonnage.

Dosage des phosphates

- Mode opératoire

- Vérifier le pH de l'échantillon qui doit être compris entre 2 et 7 l'ajuster si nécessaire.
- Introduire 20ml d'eau dans une fiole jaugée de 25ml ajouter 1 ml d'une solution d'acide ascorbique puis poursuivre comme pour l'établissement de la courbe d'étalonnage.

- Tenir compte de la valeur lue pour le témoin, se reporter à la courbe d'étalonnage.
- Prélever 10 ml à l'aide d'une pipette jaugée de la solution mère à 100 mg/l ;

Dosages des nitrites

➢ Mode opératoire

- Introduire ces 10 ml dans une fiole jaugée de 100 ;
- Compléter à 100 ml avec de l'eau distillée ;
- Boucher la fiole et bien mélanger ;
- Vérifier qu'on a ainsi réalisé une solution fille F1 à 10 mg/l de nitrites ;
- Rincer la pipette d'abord avec de l'eau distillée puis avec la solution précédente ;
- Introduire 10 ml de F1 dans une seconde fiole jaugée de 100 ml ;
- Compléter à 100 ml avec de l'eau distillée ;
- Boucher la fiole et bien mélanger ;
- Vérifier qu'on a ainsi réalisé une solution fille F2 à 5 mg/l de nitrites.
- Afficher 543 nm sur le photocolorimètre ;
- Remplir la cuve avec le contenu de la fiole T ;
- Annuler la densité optique de T ;
- Mesurer la densité optique des solutions 1, 2, 3, 4, E.
- Tracer la courbe d'étalonnage;
- Reporter sur la courbe d'étalonnage la densité optique de l'échantillon,
- Déduire la concentration en nitrites.

Le potentiel d'hydrogène, la température, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et les solides dissous totaux ont été analysés in situ à l'aide d'une multisonde d'un appareil de marque HACH en immergeant la sonde appropriée pour chaque paramètre en secouant et en lisant sur l'écran de l'appareil dès que la valeur est stable. La sonde est rincée à l'eau déminéralisée et bien essuyée pour chaque mesure. L'appareil affiche les valeurs mesurées en µS/cm pour la conductivité électrique, en °C pour la température, mg/l pour les solides dissous totaux et mg /l pour l'oxygène dissous.

La mesure de la DBO_5 est faite selon la méthode manométrique basée sur le principe du respiromètre de WARBURG au cours duquel la respiration de la biomasse est directement mesurée par un appareil. Un volume d'échantillon est placé dans des flacons à bouchon rodé.

Principe de la méthode manométrique

Une quantité d'eau est versée dans une bouteille d'incubation de 300 ml, reliée à un manomètre à mercure ou fermée avec un bouchon muni d'un capteur de pression (oxytop). Le volume choisi est fonction de la gamme de mesures souhaitée. L'appareil de mesure, de type IS 602, est placé dans un réfrigérateur maintenu à 20°C. On suit ensuite, en fonction du temps, soit tous les jours pendant 5 jours pour la DBO_5, la consommation d'oxygène, qui se traduit par une diminution de la pression d'air. On procède enfin à la correction de la mesure par un facteur correctif qui dépend de la quantité d'échantillon prélevée et de la gamme de mesure souhaitée.

L'oxydation des matières organiques provoque la formation de CO_2 qui sera piégé par une solution de KOH. Ainsi il se développe une dépression dans la bouteille.

L'adjonction de 1 allyle 2 thio-urée : $C_4H_8N_2S$ permet d'inhiber la nitrification car l'oxydation des dérivés ammoniacaux et des nitrites en nitrates absorbe également de l'oxygène. Cette amine joue un rôle d'inhibiteur. A introduire pour la mesure des eaux de sortie.

- Mode opératoire

- Mesurer la quantité désirée avec le ballon jaugé de trop-plein et verser dans la bouteille propre ;
- Introduire l'agitateur magnétique dans chaque bouteille ;
- Ajouter une pincée de l'allyle thio-urée ;
- Mettre 2 pastilles d'hydroxyde de potassium dans chaque bouchon intérieur (noir) avec deux pincettes ;
- Visser sans fermer hermétiquement le bouchon ;
- Mettre sur le système d'agitation à 20 °C ;
- Laisser s'établir l'équilibre pendant 30 min et fermer hermétiquement le bouchon ;
- Relever les valeurs après 5 jours (système Oxytop) ;
- Utiliser les mesures des autres groupes et déterminer la précision des mesures.

Il est recommandé d'effectuer le double de chaque dosage (selon la disponibilité du matériel de mesure).

La demande chimique en oxygène DCO

➢ Mode opératoire

- Les solutions étalons et les échantillons sont traités de la même façon.
- Homogénéiser l'échantillon.
- Prélever à l'aide d'une pipette 2,5 ml d'échantillon et l'introduire dans une éprouvette.
- Ajouter lentement 1,5 ml de la solution de digestion à l'aide d'une burette automatique dans chaque éprouvette.
- Ajouter lentement 3,5 ml du réactif acide à l'aide d'une burette automatique dans chaque éprouvette et visser fermement le bouchon. Mélanger par la suite à l'agitateur à vortex. Lors du mélange, la chaleur dégagée est très grande.
- Porter à reflux dans un bloc chauffant à une température de 150 °C ± 2 °C pendant une période de 2 heures.
- Laisser refroidir à la température ambiante.
- Agiter le tube par inversion ou avec l'agitateur à vortex avant le dosage. Si l'échantillon contenu dans l'éprouvette est trouble, centrifuger pendant 15 minutes à une vitesse d'environ 1800 tr/min.

II.5. Détermination et mesures des paramètres bactériologiques

Les coliformes totaux, les coliformes fécaux et l'*Escherichia coli* ont été dénombrés au cours de cette étude.

La méthode directe de dénombrement a été utilisée en comptant directement les cellules microbiennes ou leurs colonies. Au terme de cette étude, le dénombrement par culture a utilisé des milieux favorables pour dénombrer les colonies par unités de volume (Dziezak, 1987; Bourgeois et Mafart ,1991). Le dénombrement par culture en milieu solide a été également fait dans le présent travail en se basant sur le fait que chaque colonie macroscopique visible provient d'une cellule microbienne ou UFC (unité formant colonie).

➢ Mode opératoire

- Stériliser impérativement tout le matériel destiné à être utilisé,
- Allumer le bec bunsen pour travailler dans des conditions strictement stérile,

- Placer la membrane filtrante appropriée (verte pour les germes totaux et blanche pour les *coliformes* et *Escherichia coli*) sur le poste correspondant,
- Replacer l'entonnoir tout en assurant l'étanchéité.

Pour les germes totaux

Verser 100ml de l'eau stérilisée dans l'entonnoir (jusqu' au premier trait ou à la première graduation), au moyen d'une pipette et embout stérile, prélever 1ml de l'échantillon et l'ajouter dans 100ml de l'eau stérilisée dans l'entonnoir.

Pour les coliformes fécaux

Toujours dans les mêmes conditions et au moyen d'une pipette, prélever 1 ml de l'échantillon et les verser dans l'entonnoir (poste) correspondant.

Pour les Escherichia coli

Comme les coliformes fécaux,

- Filtrer en mettant en place le dispositif de filtration,
- Pipeter environ 3ml d'eau stérilisée pour imbiber les cartons nutritifs (milieux de culture lyophiles) devrait être utilisés,
- Dans des conditions rigoureusement stériles (au moyen d'une pincette stérilisée et refroidie dans l'eau stérilisée), enlever la membrane filtrante et la déposer sur le carton nutritif imbibé, place dans la boîte correspondant à l'échantillon ;
- Placer les boites contenant le milieu de culture (boîtes de pétrie) et les membranes dans l'incubateur pendant 24heures et l'incubateur est réglé à 44 ^{0}C.

II.6. Analyse des résultats

Les résultats ont été saisis dans l'Excel 13 et le test ANOVA a été utilisé pour comparer les moyennes des différents paramètres physico-chimiques et bactériologiques entre les stations d'échantillonnages et entre les mois à l'aide du logiciel SPSS. L'analyse de redondance de l'influence des paramètres physico-chimiques sur la distribution de la flore bactérienne a été faite avec le logiciel CANOCO version 5. Pour ce faire faire, les permutations de Monte Carlo ont été faites (n=499).

CHAPITRE III. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.

III.1. Présentation des résultats

A. Paramètres physico-chimiques

1. Variation temporelle des paramètres physico-chimiques de la rivière

Les résultats des paramètres physico-chimiques ont montré. Pour la température, la valeur maximale est de 26,50 ^{0}C et s'observe au mois d'août, la valeur minimale est 24,33 ^{0}C et a été notée au mois de mai. Le pH est presque constant la valeur élevée est de 7,60 enregistrée au mois d'août alors que la plus petite valeur est de 7,23 notifiée au mois d'avril. Pour la conductivité électrique la valeur maximale est de 199,67 µS/cm observée au mois de juin alors que la valeur minimale est de 104,50 µS/cm enregistrée au mois de juillet. Pour les solides totaux dissous la valeur maximale a été observée au mois juin et est de 90,34mg/l et la valeur minimale a été enregistrée au mois d'août et est de 58,73mg/l.

La plus grande valeur d'oxygène dissous a été de 2,73 mg O_2/l notée au mois de juin et la plus petite valeur est de 1,067 mg O_2/l observée au mois de mai. La grande valeur de la demande biochimique en oxygène a été de 65,60 mg O_2/l observée au mois d'août, la petite valeur a été de 57,61 mg O_2/l notée au mois de mai. La demande chimique en oxygène est plus élevée au mois d'août et a été de 82,00 mg O_2/l et a diminué au mois de mai avec une valeur de 71,33 mg O_2/l.

Concernant les sels dissous dans l'eau, les nitrites ont connu une concentration maximale au mois d'août avec 13.32 mg/l et la concentration minimale a été observée au mois de mars avec 2,75 mg/l. Pour les nitrates la concentration maximale a été de 21,65 mg/l enregistrée au mois d'août est la concentration minimale a été de 3,23 mg/l notée au mois de mars. Les phosphates ont une grande concentration au mois d'août, la concentration maximale est de 0,362 mg/l et la concentration minimale est de 0,106 mg/l observée au mois d'avril (Tableau 4).

Tableau 4: Variation temporelle des paramètres physico-chimiques

Paramètres	*Mars*	*Avril*	*Mai*	*Juin*	*Juillet*	*Août*	*Septembre*	*Octobre*	*p-value*	*Sign. P<0.05*	*Nor ES*	*Nor OMS*
T°C	25.07±0.63	25.50±0.45	24.33±0.66	24.37±1.11	24.80±2.30	26.50±2.58	25.93±0.60	25.47±2.05	0.02	S	25	25 à 28
pH.	7.47±0.21	7.23±0.42	7.33±0.49	7.27±0.21	7.57±0.17	7.60±0.28	7.17±0.57	7.43±0.21	0.001	S	6 á 9	6,5 à 9
CE (µS/cm)	114.47±6.58	116.00±3.74	134.00±8.29	199.67±6.82	104.50±4.89	111.67±5.19	157.33±4.62	113.00±3.83	0.21	NS	50-1500	400 - 1000
TDS (mg/l)	82.32±5.12	84.17±2.41	67.52±7.31	90.34±9.27	63.43±2.43	58.73±2.36	79.23±6.37	52.23±1.25	0.21	NS	≤500	
Ox. Diss. (mgO_2/l)	1.767±0.66	1.173±0.23	1.067±0.21	2.733±0.29	2.100±0.24	1.287±0.53	3.100±0.54	4.033±0.25	0.001	S	8,11	≥3
DBO5 (mgO_2/l)	59.47±o.76	63.47±1,98	57.61±1.29	58.93±3.41	57.61±1,03	65.60±3.13	61.07±1.82	62.00±4.12	0.26	NS	6	≤3
DCO (mgO_2/l)	74.33±0.23	79.33±2.63	71.33±1.71	73.67±4.12	72.00±0.46	82.00±2.26	76.33±1.47	80.00±0.23	0.32	NS		
$NO2^-$ (mg/l)	2.756±0.40	3.050±10.63	3.566±0.76	3.485±1.77	3.193±0.53	13.320±12.40	7.747±12.13	3.327±0.45	0.001	S	2	≤ 3
$NO3^-$ (mg/l)	3.238±0.76	4.790±1.72	4.073±4.25	4.066±2.45	10.313±1.94	21.659±8.00	8.204±1.41	5.287±1.58	0.16	NS	2	≤ 50
$PO4^{3-}$ (mg/l)	0.161±0.033	0.106±0.008	0.261±0.082	0.310±0.045	0.145±0.010	0.362±0.031	0.151±0.032	0.141±0.002	0.003	S	1	≤ 0,2

NS : Non Significative, Nor : Normess

S : Significative, ES : Eau de Surface

2. Variation spatiale des paramètres physico-chimiques de la rivière

La température la plus élevée pour les trois stations d'échantillonnage est observée à la station trois et est de 26,74 ^{0}C. La température la plus basse se trouve à la station 1 et est de 23,69 ^{0}C. La valeur du pH maximale est de 7,54 observée à la station 3 et la valeur minimale est de 7,24 observée station 1. La valeur de la conductivité électrique la plus élevée a été observée à la station 3 et a été de 165,75 mg/l et la plus basse valeur a été de 101,01 mg/l observée à la station1.

Les solides totaux dissous ont montré une concentration maximale à la troisième station avec 80,23 mg/l. La concentration minimale a été de 57,71 mg/l observée au niveau de la première station1.

Pour l'oxygène dissous la plus grande valeur a été observée à la première station et a été de 3,74 mg O_2/l. La plus petite valeur a été de 1,29 mg O_2/l observée à la troisième station. La demande biochimique en oxygène et la demande chimique en oxygène ont été élevées à la troisième station avec respectivement les valeurs de 61,36 mgO_2 /l et 76,70 mg O_2/l. Et les petites valeurs 47.63 mgO_2 /l et 64.52 mgO_2 /l.

Pour les nitrates et les nitrites les concentrations élevées sont observées á la troisième station avec les concentrations maximales qui sont respectivement de 11,65 mg/l et e 8,54 mg/l et les concentrations minimales sont observées à la première station et sont respectivement de 6,82 mg/l et de 5,12 ml/l. Les phosphates ont une concentration élevée à la troisième station d'échantillonnage avec une valeur maximale de 0,313 mg/l et une valeur minimale de 0,163 mg/l observée à la première station. Seuls le pH et les phosphates ont connu de variations significatives ($p<0,05$) alors que les autres paramètres n'ont pas varié significativement (Tableau 5).

Tableau 5 : Variation spatiale des paramètres physico-chimiques de la rivière

Paramètres	*Station 1*	*Station 2*	*Station 3*	*p-value*	*sign. P<0.05*	*Normes ES*	*Normes OMS*
T°C	23.69±0.89	25.31±1.18	26.74±1.30	0.12	NS	25	25 à 28
pH.	7.24±0.36	7.48±0.22	7.54±0.47	0.001	S	6 á 9	6,5 à 9
CE (µS/cm)	101.01±1.34	127.22±2.19	165.75±3.64	0.06	NS	50-1500	400 à 1000
TDS (mg/l)	57.71±1.72	71.34±0,23	80.23±1,78	0.14	NS	≤1200	≤600
Ox. Diss. (mgO2/l)	3.74±0.97	2.43±0.17	1.29±0.03	0.071	NS	8,11	≤ 0,07
DBO5 (mgO2/l)	47.63±0.454	58.81±0.98	61.36±2.12	0.052	NS	6	≤3
DCO (mgO2/l)	64.52±0.23	73.54±1.34	76.7±2.83	0.051	NS		
$NO2^-$ (mg/l)	5.120±8.22	6.756±9.28	8.540±8.18	0.15	NS	2	≤ 3
$NO3^-$ (mg/l)	6.825±5.04	7.506±5.53	11.656±9.44	0.081	NS	2	≤ 50
$PO4^{3-}$ (mg/l)	0.163±0.05	0.202±0.063	0.313±0.061	0.003	S	1	≤ 0,2

La figure suivante illustre la variation des différents paramètres de la rivière. Il est clair que la station 3 a enregistré des teneurs les plus élevées durant toute la période d'échantillonnage (Figure 2).

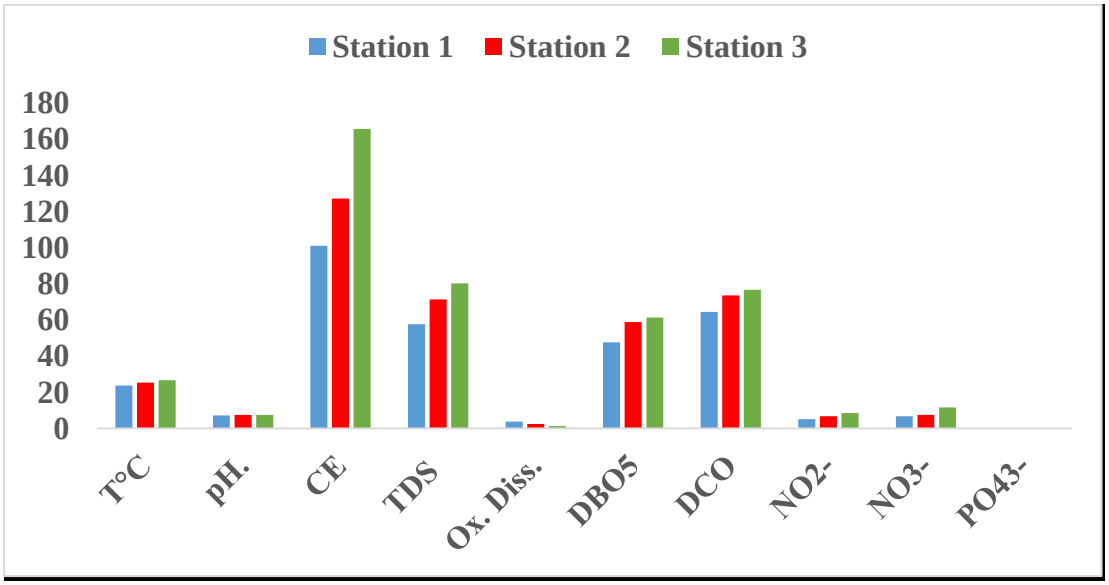


Figure 2 : Variation des paramètres physico-chimiques de la rivière Nyakagunda

B. Paramètres bactériologiques

1. Variation temporelle des paramètres Bactériologiques de la rivière

Pour les paramètres bactériologiques et dans l'analyse temporelle, les paramètres étudiés ont montré la présence des bactéries dans les eaux de la rivière Nyakagunda. C'est au mois de mars qu'on a observé la grande quantité des coliformes fécaux. La valeur maximale est de 1300 UFC/100ml et la petite quantité est observée au mois d'août. La valeur minimale est de 93 UFC/100ml.

Les coliformes totaux ont été aussi présents dans les eaux de la rivière. La quantité maximale a été observée au mois de mars avec une valeur maximale de 3566 UFC/100ml et la valeur minimale a été observée au mois de juillet avec une quantité de 426 UFC/100ml. Les *E coli* ont été enregistrés en grande quantité au mois de mars avec une quantité maximale de 120 UFC/100ml tandis que la quantité minimale a été enregistrée au mois d'octobre avec une valeur minimale de 43 UFC/100ml (Tableau 6).

Tableau 6: Variation temporelle des paramètres bactériologiques

Paramètres	*Mars*	*Avril*	*Mai*	*Juin*	*Juillet*	*Août*	*Septembre*	*Octobre*	*p-value*	*sign. P<0.05*	*Norm ES*	*Norm OMS*
Coliformes F.(UFC/100ml)	1300.00±408.25	1066.67±385.86	220.00±199.50	226.67±264.11	433.33±542.18	93.33±75.87	900.00±489.90	270.00±128.32	0.53	NS		
Coliformes.T (UFC/100ml)	3566.67±1327.49	1066.67±1104.54	1533.33±249.44	700.00±244.95	503.33±210.13	800.00±1756.89	2533.33±1276.28	426.67±204.02	0.61	NS		
E.coli (UFC/100ml)	120.00±48.99	106.67±47.84	63.33±41.10	70.00±40.82	53.33±41.90	93.33±77.17	103.33±84.98	43.33±12.47	0.23	NS		

NS : Non Significative, Norm : Normess

S : Significative, ES : Eau de Surface

1. Variation spatiale des paramètres bactériologiques

Les coliformes fécaux ont été abondants à la station d'échantillonnage 3 avec une valeur de 976 UFC/100ml. Ils ont diminué à la station 1 avec une valeur de 256 UFC/100ml. Quant aux coliformes totaux, ils ont été abondants à la station 3 avec une valeur de 2687 UFC/100ml. Ils ont diminué à la station 1 avec une valeur de 993 UFC/100ml. Les *Escherichia coli* sont abondants aussi à la station 3 avec une valeur de 337 UFC/100ml tandis qu'ils ont été en petite quantité à la station 1 avec une valeur de 121 UFC/100ml.

Tableau 7 : Variation spatiale des paramètres bactériologiques

Paramètres	*station 1*	*station 2*	*station 3*	*p-value*	*sign. p<0.05*	*Norm ES*	*Norm OMS*
Coliformes F(UFC/100ml)	256.25±298.03	458.75±465.98	976.25±579.18	0.089	NS		0
Coliformes T (UFC/100ml)	993.75±683.68	1617.5±1182.34	2687.5±2029.43	0.31	NS		0
E.coli (UFC/100ml)	121.25±221.44	183.75±273.81	337.5±482.93	0.76	NS		0

A. Influence des paramètres physico-chimiques sur la distribution de la flore bactérienne

L'analyse de redondance (RDA) a été appliquée à l'ensemble des variables biotiques et environnementales. Les deux axes contribuent à 99,9% de la variance totale et fournissent une information suffisante sur la distribution des paramètres. La DCO et la DBO_5 sont corrélées à la vue de l'angle entre les deux axes qui les séparent sur le graphique ($\alpha < 60°$) avec un coefficient de corrélation r= 0,97. La température est corrélée à la DBO_5 et à la DCO, aux nitrites et nitrates. Les nitrites et nitrates sont également corrélés entre eux. En plus, cette analyse a sélectionné les paramètres qui ont une incidence sur la présence ou l'absence des communautés bactériennes. Il s'agit de l'oxygène dissous, les nutriments et les matières organiques. Le graphique montre que la température influence la présence *des coliformes totaux* y compris l'*Escherichia coli*. La corrélation positive entre *les coliformes totaux*, les nitrates et les nitrites est notée (Figure 3).

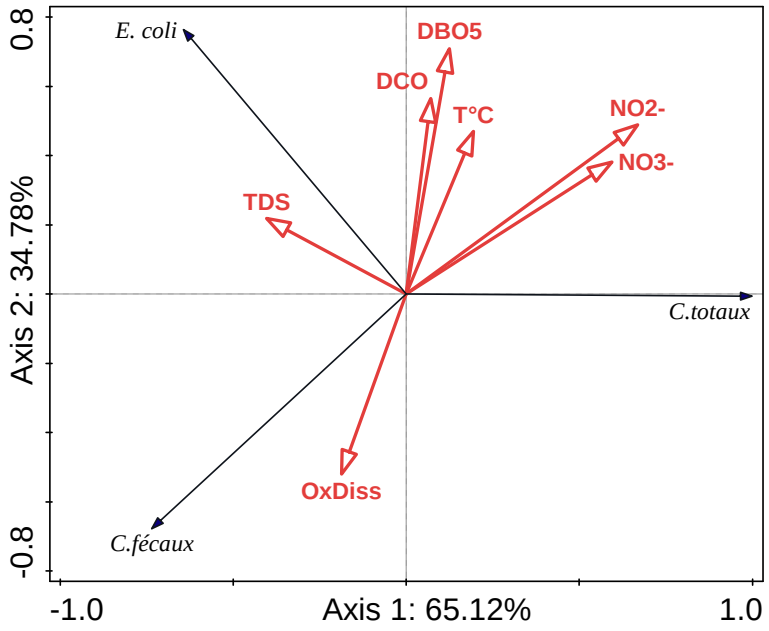


Figure 3 : Analyse de redondance de l'influence des paramètres physico-chimiques sur la distribution de la flore bactérienne.

III. 2. Discussion des résultats

La température constitue un paramètre important dans l'environnement aquatique (Chapman, 1996 ; Derwich, et al. 2010). Elle conditionne la vie des organismes animaux et végétaux comme les algues (Akatumbila, 2011). La température enregistrée dans le cadre de la présente étude est presque la même dans toutes les stations échantillonnées. Elle est liée au climat de la région de l'Imbo. C'est pourquoi elle n'a pas connu de variations significatives. La variation de température observée au mois d'août est liée au changement de climat de la période pluvieuse à celle sèche. Des résultats similaires ont été signalés dans d'autres études dans le bassin de la rivière Alibori (Houelome, 2017). Cette variation de température au cours du temps ne peut en aucun cas causer des problèmes pour la santé des habitants qui utilisent souvent cette eau. Cependant des températures très élevées sont néfastes à la vie aquatique. Elles modifient les réactions chimiques et de ce fait, inhibent certaines fonctions biologiques.

Le potentiel d'hydrogène mesure le degré de basicité et d'acidité d'une eau. Les valeurs de pH enregistrées pour la présente étude se placent dans les limites acceptables pour la vie aquatique et est conforme caractéristiques des eaux de surface.

En effet, des valeurs extrêmes de pH ne sont pas propices pour les organismes vivants aquatiques et marins. Buhungu et al. (2018) ont corroboré ces résultats sur la rivière Kinyankonge. Le pH des eaux de la rivière Nyakagunda est dans les normes recommandées par l'OMS (2004).

La conductivité électrique permet d'évaluer de façon approximative la minéralisation globale du milieu aquatique et d'en faire le suivi de l'évolution (Akil, et al. 2014; Derwich et al., 2010). Les résultats trouvés contiennent des sels minéraux qui ne dépassent pas les normes de l'OMS(2004) pour les eaux de consommation et aussi pour les eaux de surface. Le profil de variation de la conductivité électrique et des TDS montre que ces deux paramètres évoluent dans le même sens. D'après l'analyse spatiale que ce soit pour les paramètres physico-chimique ou bactériologiques, nous constatons que la rivière Nyakagunda connait une pollution remarquable au niveau du centre Rugombo où il y a une agglomération de la population. La station située en avant de la rivière montre une forte minéralisation par conséquent l'affluent de cette rivière est aussi exposé, Ahouansou Montcho, a trouvé des résultats qui réconfortent ce constat (Montcho, et al. 2011). Les sources primaires pour les TDS dans les eaux réceptrices sont le ruissellement agricole et résidentiel, le lessivage de la contamination des sols et toute source ponctuelle de pollution de l'eau.

L'augmentation de ces sels minéraux valeurs observée aux mois de juin et septembre coïncident avec les mois où les agriculteurs utilisent des engrais chimique et d'autres pesticides dans les champs. Ce qui charrie ces substances dans les eaux de la rivière Nyakagunda lors de l'irrigation. Au point de vue de la qualité d'eau de surface les valeurs trouvées n'excèdent pas les normes des eaux de surface ainsi que ceux des eaux de boissons. Les résultats trouvés pour l'oxygène dissous ont montré une faible concentration. Ce qui renseigne que la qualité des eaux n'est pas assez bonne une pollution organique est observée dans cette rivière, les valeurs similaires ont été trouvées dans le bassin de la rivière alibori (Dovonou, et al. 2011) même si, la concentration en oxygène dissous trouvée ne dépasse pas les normes pour les eaux de surface, la population qui utilise l'eau de la rivière Nyakagunda est exposée à cette pollution organique. Les faibles concentrations d'oxygène dissous ont été obtenues au niveau des stations situées en aval pendant les mois de juin, juillet et août où on note une intensification des activités anthropiques notamment l'agriculture, Agbohessi a enregistré des résultats similaires (Agbohessi, et al. 2015).

En plus, cet état pourrait être justifié en partie par les fortes teneurs en matières solides en suspensions observées. Ces matières une fois biodégradées contribuent à la diminution en oxygène lors de sa dégradation ce constat a été affirmé par Dedjiho (Dedjiho, et al. 2013). L'utilisation des fertilisants, favorise le développement des plantes aquatiques et contribuent sérieusement à la diminution des teneurs en oxygène (Madjiki, et al. 2013).

Les fortes concentrations de nitrites s'expliquent aisément par les fortes concentrations de nitrates et les faibles teneurs en oxygène dissous qui règnent dans les eaux de la rivière (Aguey-Zinsou, et al. 2006). L'augmentation de ces concentrations pour les stations 2 et 3 est due aux activités observées aux environs des stations comme l'abattoir qui se trouve à 50m de la station 2, l'agriculture intensive du riz et le caniveau transportant les rejets ménagers.

La présence du phosphore en forte concentration favorise l'eutrophisation. Cette forte concentration hors normes pour les eaux de consommation (OMS 2004) a été obtenue aux mois de juin et août comme on l'a constaté pour d'autres paramètres physico-chimiques, pendant cette période la rivière Nyakagunda est exposée à une pollution parce que, pendant cette période sèche il y'a la carence d'eau potable et la population fait la lessive et se la lave dans la rivière Nyakagunda à cela s'ajoute les engrais chimique (phosphatés et azotés) et les pesticides qu'on utilise dans les champs. Il s'agit d'une période où il n'y a pas beaucoup de pluie et la population fait recours à l'irrigation. Ces différents matières et substances se trouvant dans les champs sont transportées dans la rivière avec les eaux après irrigation.

Les pratiques agricoles dans la zone contribuent à l'enrichissement du milieu en engrais phosphatés et azotés ce qui justifient le niveau de concentration de ces nutriments dans l'eau. En plus, les phosphates font partie des anions assimilables par le corps humain (Rodier, 1984). Quel que soit leur origine (domestique, industrielle ou agricole), leur présence dans les eaux à fortes concentration (teneurs supérieures à 0,3 mg/l) favorise le développement massive d'algues, lesquelles conduisent à l'eutrophisation des lacs et des cours d'eau (Rodier, 1984).

La Demande Biochimique en Oxygène pendant cinq jours correspond à la quantité de dioxygène nécessaire aux micro-organismes aérobies de l'eau pour oxyder les matières organiques, dissoutes ou en suspension dans l'eau. Les valeurs élevées (hors normes) de la Demande Biochimique en Oxygène trouvées pour le cas de notre travail, indiquent la pollution organique que connait les eaux de cette rivière.

Ces matières organiques proviennent d'une part des rejets domestiques et d'autre part de l'abattoir se trouvant tout prêt de cette rivière et des débris végétaux que transporte cette rivière pendant la saison pluvieuse. Cette augmentation des matières organiques dans les eaux de la rivière Nyakagunda va favoriser la consommation potentielle de dioxygène par voie biologique. Cette consommation provoquera une chute de l'oxygène dissous dans le milieu récepteur et conduira à l'asphyxie des espèces présentes. Cette pollution organique est plus remarquable aux environs de la partie traversant le centre Rugombo.

Comme pour la DBO_5 les résultats trouvés pour la DCO indiquent la présence de matières organiques, des sels minéraux et des rejets domestiques qui peuvent appauvrir le milieu en oxygène dissous dans l'eau, entraînant des conséquences négatives sur l'environnement et les organismes se trouvant dans la rivière (Madjiki, et al. 2013). Les résultats trouvés pour la DCO sont aussi influencés par la température élevée enregistrée dans cette zone, car elle favorise les réactions chimiques.

La présence de coliformes fécaux dans l'échantillon d'eau est une bonne indication de contamination fécale récente. Les coliformes fécaux doivent être absents dans un échantillon de l'eau utilisée comme consommation humaine. La présence de coliformes totaux uniquement dans l'échantillon d'eau indique la contamination de l'environnement (Niyoyitungiye, 2020). Selon l'OMS (2011), la présence des coliformes totaux dans l'eau confirme le non potabilité de l'eau. Au terme de la présente étude, l'augmentation des coliformes fécaux, coliformes totaux et les *Escherichia coli* s'observe de l'amont à l'aval.

La présence d'*Escherichia coli* dans l'échantillon d'eau indique presque toujours la présence de matières fécales puis la présence éventuelle de pathogènes d'origine humaine (Niyoyitungiye et al. 2020). Pour de fins de consommation humaine, il ne devrait pas y avoir des *Escherichia coli* (OMS 2004)

Les germes bactériens analysés ont été présents durant toute la période d'étude et dans toutes les stations échantillonnées. Ce qui exige un traitement préalable pour la consommation. La population de la zone d'études en consommant les eaux de la rivière Nyakagunda sont contaminées par les *Escherichia coli* et les coliformes fécaux. D'où les maladies diarrhéiques qui sont observées surtout quand il y a panne (carence) d'eau dans cette zone.

Cette étude a montré que la distribution de la flore bactérienne est influencée des paramètres physico-chimiques comme l'oxygène dissous qui est nécessité par les organismes lors de la respiration. Mais la plupart de bactéries peuvent agir même en milieu anaérobie. Les températures peuvent aussi influencer la présence ou l'absence de bactéries selon qu'elles sont thermo tolérantes ou sensibles (Nola, et al. 2006).

CONCLUSION

Les paramètres physico-chimiques des eaux de la rivière Nyakagunda sont de bonne qualités pour les caractéristiques des eaux de surface, mais les eaux de cette rivière sont nuisible à la sante en tenant compte que la population utilise parfois cette eau pour usage domestique; elles ne remplissent pas les normes d'eau de boisson. Cette pollution s'observe souvent aux endroits où il y a une agglomération de la population surtout aux environs du centre Rugombo la concentration élevée des ions phosphates observée surtout pendant la période sèche a des conséquences sur les écosystèmes aquatiques se trouvant dans cette rivière ainsi que ces affluents. Les eaux de la rivière sont aussi riches en nutriment; La plupart des nutriments observés proviennent des activités anthropiques notamment l'agriculture et les ménages environnants. L'analyse bactériologique a montré que ces eaux sont contaminées par des germes susceptibles de causer des maladies diarrhéiques. La présence des coliformes en plus grandes quantité indique une forte probabilité de trouver d'autres bactéries et virus pathogènes à la sante.

Recommandations et perspectives

Comme la population environnante fait recours à ces eaux pour des fins domestiques ;

- Il faut que le Gouvernement prenne des mesures nécessaires afin d'éviter les maladies diarrhéiques liées aux mains sales qui s'observent souvent dans cette zone;
- Il faut que l'administration locale prenne des mesures de prévention par approvisionnement en eau potable de façon régulière;
- Prévoir des séances de sensibilisation à l'intention de la population locale en les interdisant à déféquer à l'air libre et en leur instruisant sur les conséquences liées à la pollution des eaux par les bactéries d'origine fécale;
- Faire le suivi régulier de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la rivière Nyakagunda;
- Aux chercheurs de continuer la recherche sur des écosystèmes similaires et sur un grand nombre d'échantillons et de paramètres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. AFNOR. 2001. “Facilities for people living at home” afnor system of reference. *Gerontologie et Societe*, *99*(4), 241–254.
2. Agate, W., Uluski, R., Kumar, J., Venkata, S. M., Vishwakarma, D., Schneider, K., Mehrizi-Sani, A. 2017. Microgrid controller design, implementation, and deployment: A journey from conception to implementation at the philadelphia navy yard. IEEE power and energy magazine, 15(4), 50-62.
3. Agbohessi, P. T., Toko, I. I., Atchou, V., Tonato, R., Mandiki, S. N. M., Kestemont, P. 2015. Pesticides used in cotton production affect reproductive development, endocrine regulation, liver status and offspring fitness in African catfish Clarias gariepinus (Burchell, 1822). Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 167, 157-172.
4. Aguey-Zinsou, K. F., Fernandez, J. A., Klassen, T., Bormann, R. 2006. Using MgO to improve the (de) hydriding properties of magnesium. Materials Research Bulletin, 41(6), 1118-1126.
5. Akatumbila, L. 2011. Caractérisation biologique de la qualité de l’eau par l’étude de la flore algale des rivières Nsele et Gombe à Kinshasa. Mém. de Diplôme d’Etudes.
6. Akil, A., Hassan, T., Lahcen, B., Abderrahim, L. 2014. Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc. European Scientific Journal, 10(23).
7. Allalgua, A., Kaouachi, N., Ayari, A., Boualleg, C., Bensouilah, M. 2017. Étude Comparative De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Des Barrages Ain Dalia Et Foum El-Khanga, Région De Souk-Ahras (Algérie). Bulletin de la Societe Zoologique de France, 142(2).
8. Amira, S., Rotondo, A., Mulè, F., 2008. Relaxant effects of flavonoids on the mouse isolated stomach: structure-activity relationships. European journal of pharmacology, 599(1-3), 126-130.
9. Aylward, B., Bandyopadhyay, J., Belausteguigotia, J. C., Borkey, P., Cassar, A. Z., Meadors, L., Bauer, C. 2005. Freshwater ecosystem services. Ecosystems and human well-being: policy responses, 3, 213-256.

10. Belghiti, M. L., Chahlaoui, A., Bengoumi, D. 2013. Etude De La Qualite Physico-Chimique Et Nappe Plio-Quaternaire Dans La Région De Meknès. *Larhyss Journal,14*(March 2009), 21–36.
11. Ben Abdelghani, M., Conroy, T., Hammel, P., Hebbar, M., Wei, A.C., Raoul, J.L., Choné, L., Francois, E., Artru, P., Biagi, J.J. Lecomte, T., 2018. FOLFIRINOX or gemcitabine as adjuvant therapy for pancreatic cancer. New England Journal of Medicine, 379(25), 2395-2406.
12. BenAjiBA, M. H., Saoud, Y., Lamribah, A., Ahrikat, M., Amajoud, N., Ouled-Zian, O. 2013. Evaluation de la qualité microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc. Revue des sciences de l'eau, 26(3), 223-233.
13. Boeglin, M. L., Wessels, D., & Henshel, D. 2006. An investigation of the relationship between air emissions of volatile organic compounds and the incidence of cancer in Indiana counties. Environmental Research, 100(2), 242-254.
14. Bourgeois, C. M., Mafart, P. 1991. Techniques globales d'évaluation de la microflore. Techniques d'analyses et de contrôle dans les industries agro-alimenteires, 3, 50-71.
15. Bouziani, M., Goita, K., He, D.C., 2007, July. Change detection of buildings in urban environment from high spatial resolution satellite images using existing cartographic data and prior knowledge. In 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2581-2584.
16. Buhungu, S., Montchowui, E., Barankanira, E., Sibomana, C., Ntakimazi, G., Bonou, C. A. 2018. Caractérisation spatio-temporelle de la qualité de l'eau de la rivière Kinyankonge, affluent du Lac Tanganyika, Burundi. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 12(1), 576-595. Centre d'échange d'information du Burundi, 2012.
17. Chapman, P. M. (1996). Presentation and interpretation of sediment quality triad data. Ecotoxicology, 5, 327-339.
18. Dèdjiho, C.A., Mama, D., Tomètin, L., Nougbodé, I., Chouti, W., Sohounhloué, C.K.D. Boukari, M., 2013. Évaluation de la qualité physico-chimique de certains tributaires d'eaux usées du lac Ahémé au Bénin. Journal of applied biosciences, 5608-5616.
19. Demdoum, S., Munoz, F. Delgado, I., 2010. Forage production of a collection of sainfoin over a three year period. The contributions of grasslands to the conservation of Mediterranean biodiversity. Options Méditerranéennes, 101-104.

20. Derwich, E., Benaabidate, L., Zian, A., Sadki, O., Belghity, D. 2010. Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (8).
21. Dovonou, F., Aina, M., Boukari, M., Alassane, A., 2011. Pollution physico-chimique et bactériologique d'un écosystème aquatique et ses risques écotoxicologiques: cas du lac Nokoué au Sud Benin. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 5(4), 1590-1602.
22. Drissi, M., Ahmed, Z. B., Dehecq, B., Bakour, R., Plesiat, P., Hocquet, D. 2008. Antibiotic susceptibility and mechanisms of β-lactam resistance among clinical strains of Pseudomonas aeruginosa: first report in Algeria. Medecine et maladies infectieuses, 38(4), 187-191.
23. Duvignaud, J. 1980. Violence et société. Raison présente, 54(1), 5-18.
24. Dziezak, J. D. 1987. Crystalline fructose: A breakthrough in corn sweetener process technology. Food technology (Chicago), 41(1), 66-72.
25. El Haissoufi, H., Berrada, S., Merzouki, M., Aabouch, M., Bennani, L., Benlemlih, M., Lalami, A. E. O. 2011. Pollution des eaux de puits de certains quartiers de la ville de Fès, Maroc. Revue de microbiologie industrielle sanitaire et environnementale, 5(1), 37-68.
26. Emmanuel, E., Perrodin, Y., Keck, G., Blanchard, J.-M., Vermande, P. 2002. Effects of hospital wastewater on aquatic ecosystem. In Proceedings of the XXVIII Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. Cancun, México, Eurpean scientificjournal, 2015, vol. 11, no 15.
27. Falkenmark, M., Widstrand, C. 1992. Population and water resources: a delicate balance. Population bulletin, 47(3), 1-36.
28. FAO. 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres— Enquête *AQUASTAT: Burundi*.
29. Fotos, N., Patelarou, E., Giourgouli, G., Lykeridou, A., Vrioni, E., Siamaga, E., Brokalaki, H. 2011. Association between biomarker-quantified antioxidant status during pregnancy and infancy and allergic disease during early childhood: a systematic review. Nutrition reviews, 69(11), 627-641.
30. Geny, B., Cockcroft, S., 1992. Synergistic activation of phospholipase D by protein kinase C-and G-protein-mediated pathways in streptolysin O-permeabilized HL60 cells. Biochemical Journal, 284(2), 531-538.

31. Guentri, S., Rahmania, F. 2015. Contribution à la connaissance de la remontée et la pollution des eaux. Éditions universitaires européennes.
32. Habila, N., Inuwa, M.H., Aimola, I.A., Udeh, M.U., Haruna, E., 2012. Pathogenic mechanisms of Trypanosoma evansi infections. Research in Veterinary Science, 93(1), 13-17.
33. Harrisson, S., Kapfenstein-Doak, H., Davis, T.P., 2001. Investigation of the penultimate unit effect in halogen atom chain transfer in free radical copolymerization. Macromolecules, 34(18), 6214-6223.
34. Hassoune E. M., Koulali, Y., Hadarbach, D. 2006. Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Settat (Maroc). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, (28), 61-71.
35. Henz, B.J., Hawa, T., Zachariah, M.R., 2008. Mechano-chemical stability of gold nanoparticles coated with alkanethiolate SAMs. Langmuir, 24(3), 773-783.
36. Henze, D. A., Borhegyi, Z., Csicsvari, J., Mamiya, A., Harris, K. D., & Buzsaki, G. (2000). Intracellular features predicted by extracellular recordings in the hippocampus in vivo. Journal of neurophysiology, 84(1), 390-400.
37. Hoffmann, F., Meyer, A. M., Auly, T., Barbeyron, S. 2014. L'eau. Confluences.
38. Houelome, T. A., Adandedjan, D., Chikou, A., Toko, I. I., Youssao, I., Laleye, A. 2017. Caractérisation de la qualité physico-chimique des eaux de la rivière Alibori dans le bassin cotonnier du Bénin''. AfriqueSCIENCE, (13)(4), 35-49.
39. Hounsou, M., Agbossou, E., Ahamide, B., Akponikpe, I. 2010. Qualité bactériologique de l'eau du bassin de l'Ouémé: cas des coliformes totaux et fécaux dans les retenues d'eau de l'Okpara, de Djougou et de Savalou au Bénin. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4(2).
40. Jora, I., Romanescu, G., 2011. Groundwater in the hydrographical basin of the Vaslui river. Lucrările Seminarului Geografic" Dimitrie Cantemir", 21-28.
41. Jouanneau, S., Recoules, L., Durand, M. J., Boukabache, A., Picot, V., Primault, Y., Thouand, G. 2014. Methods for assessing biochemical oxygen demand (BOD): A review. Water research, 49, 62-82.

42. Kadjangaba, E., Deubalbe, D., Bongo, D., Djimouko, S., Mbaigane, J.C.D., Mahmout, Y., 2021. Vulnerability Evaluation of Groundwater of N'Djamena City: Contribution of the Parametric Methods GOD and SI. Journal of Environmental Protection, 12(7), 472-489.
43. Kettab, A., Mitiche, R., Bennaçar, N. 2008. De l'eau pour un développement durable: enjeux et stratégies. Revue des sciences de l'eau, 21(2), 247-256.
44. Madjiki, A.G., Pial, A.C., Ndam, N.J., Amougou, A., 2013. Caractérisation hydrologique, morpho-métrique et physicochimique d'un hydrosystème urbain: Le lac municipal d'Ebolowa (Sud-Cameroun). Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie, 9(3), 122-134.
45. Matallah-Boutiba, A., Seddik, Y., Souidi, H., Boutiba, Z. 2011. Impact De La Pollution Bacterienne Sur L'oursin P. Lividus (Lck, 1816) eT La Patelle P. Caerulea (L., 1758) De La Cote Ouest Algerienne.
46. Maurel, C., Vander Willigen, C., Postaire, O., Tournaire-Roux, C., Boursiac, Y. 2006. Expression and inhibition of aquaporins in germinating Arabidopsis seeds. Plant and Cell Physiology, 47(9), 1241-1250.
47. Mharzi Alaoui, H., Assali, F., Rouchdi, M., Lahssini, S., Tahiri, D. 2015. Analyse de l'interaction entre l'éclosion des feux de forêts et les types de bioclimat au Nord du Maroc - cas de la région du Rif occidental. Revue Marocaine Des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 3(3), 46–53.
48. Mondesir, T. K., Niamke, G. M., N'cho, C. A., Anoh, K. P. 2018. Impact des facteurs physiographiques sur la pollution bacterienne des eaux de puits dans la ville de gagnoa (Cote d'ivoire). Revue bio-africa-n, 34-45.
49. Montcho, S.A., Chikou, A., Lalèyè, P.A., Linsenmair, K.E. 2011. Population structure and reproductive biology of Schilbe intermedius (Teleostei: Schilbeidae) in the Pendjari River, Benin. African Journal of Aquatic Science, 36(2), 139-145.
50. Ngô, C., Régent, A. 2004. Déchets et pollution. Edt Dunod, Paris. 152p.
51. Niyoyitungiye, L., Giri, A., Ndayisenga, M. 2020. Assessment of coliforms bacteria contamination in Lake tanganyika as bioindicators of recreational and drinking water quality. South Asian Journal of Research in Microbiology, 6(3), 9–16.

52. Nola, M., Njiné, T., Kemka, N., Togouet, S. Z., Servais, P., Messouli, M., Menbohan, S. F. 2006. Transfert des bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en région équatoriale: influence de la charge en eau appliquée en surface. Revue des sciences de l'eau, 19(2), 101-112.
53. OMS. 1994. Directives de qualité pour l'eau de boisson (Vol. 1).
54. OMS. 2004. Liens entre l'eau, l'assainissement, l'hygiène et la santé faits et chiffres-mise à jour de novembre 2004.
55. OMS/UNICEF. 2000. Programme conjoint de surveillance de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement Rapport sur l'évaluation de la situation mondiale de l'approvisionnement en eau et de l'assainissement.
56. Orelien, F. 2017. Etude de la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine dans le sous-bassin versant de Ravine Diable (Anse-à-Veau). Master's Thesis, Université de Liège, Liège, Belgique.
57. PNUD. 2018. Etude pluri-disciplinaire sur les opportunités économiques et le marché du travail Bubanza, Bujumbura rural et Cibitoke, 2018.
58. Potelon, J., Zysman, K. 1998. Guide des analyses de l'eau potable, Ed.«. La lettre du cadre territoriale». SERT Dossier d'expert, France.
59. Rodier, C., 2009. Review of international modeling literature: Transit, land use, and auto pricing strategies to reduce vehicle miles traveled and greenhouse gas emissions. Transportation Research Record, 2132(1), 1-12.
60. Rodier, J. 1984. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie.
61. Savary, J., Knoepfel, P., Nahrath, S., Varone, F., & Dupuis, J. (2010). Analyse des politiques suisses de l'environnement (Vol. 22). Zurich: Rüegger.
62. Sinarinzi, P., Van Bortel, W., Mariën, J., Jacobs, B. K., Sinzinkayo, D., Lampaert, E., Leclair, C. 2022. Long-lasting insecticidal nets provide protection against malaria for only a single year in Burundi, an African highland setting with marked malaria seasonality. BMJ Global Health, 7(12), e009674.
63. Spellman, F. R., Bieber, R. M. 2009. Occupational Safety and Health Simplified for the Chemical Industry. Government Institutes.

64. Tampo, L., Ayah, M., Grybos, M., Bawa, L. M., Bril, H., Djaneye-Boundjou, G. 2015. Qualité et pollution des eaux d'un hydrosystème littoral tropical: cas du système lagunaire de Lomé, Togo. European Scientific Journal, 11(15).
65. Wébographie
66. WHO. 2011. Guidelines for drinking-water quality.