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

Contribution à l'étude de la qualité des eaux de surface en milieu rizicole : cas de la rivière Kivogero en commune Mutimbuzi de la province Bujumbura

Ntiryica, Justin; Directeur Pr. Patrice Bigumandondera

2024-05
UB, FS
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1999

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 Intégrée de l'Environnement(MSGIE)





CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE EN MILIEU RIZICOLE : CAS DE LA RIVIERE KIVOGERO EN COMMUNE MUTIMBUZI DE LA PROVINCE BUJUMBURA

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement (**MSGIE**)

Spécialité : Eau et Assainissement

Par

NTIRYICA Justin

Directeur

Pr. Patrice BIGUMANDONDERA

Co-Directeur

Dr. Pierre NTAKIYIRUTA

Bujumbura, Mai 2024

LES MEMBRES DU JURY

Président du jury : Prof Simon BUHUNGU

Secrétaire du jury : Prof Claver SIBOMANA

Directeur de mémoire : Prof Patrice BIGUMANDONDERA

Co-Directeur : Dr. Pierre NTAKIYIRUTA

DEDICACE

A mon regretté Père ;

A ma mère ;

A mon épouse;

A ma fille;

A mes frères et sœurs ;

A mes cousins et cousines ;

A tous ceux qui me sont chers ;

Je dédie ce mémoire

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, j'exprime mes sentiments de profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à sa réalisation.

Mes premiers remerciements sont adressés au Dieu Tout Puissant, lui qui m'a prêté la vie et la force d'exécution de ce travail de mémoire.

Je tiens à témoigner mes sincères remerciements à tous les professeurs de l'Université du Burundi, plus spécialement ceux qui enseignent dans les programmes de Master de la Faculté des Sciences, pour la formation tant morale qu'intellectuelle qu'ils m'ont fait bénéficier.

Mes vifs et sincères remerciements sont adressés aussi à mes promoteurs, notamment Pr. Patrice BIGUMANDONDERA (Directeur) et Dr. Pierre NTAKIYIRUTA (Co-Directeur). Je leur exprime mon profond respect et toute ma reconnaissance du fait qu'ils ont eu confiance en moi en acceptant de diriger et de suivre mes travaux malgré leurs multiples obligations. Leurs conseils méthodologiques, leurs rigueurs scientifiques et surtout leurs disponibilités ont contribué largement à la réalisation de ce travail de mémoire.

Je ne peux jamais oublier de remercier vivement Mr. Léandre BUDIGIYE, Directeur du laboratoire d'Analyse des Eaux Africaines (Labo Des Eaux), lui qui m'a soutenu moralement, matériellement et financièrement depuis le commencement jusqu'à la fin des études de Master.

Mes remerciements vont ensuite au Dr. Ir. Lambert NIYOYITUNGIYE, Responsable du Master en Sciences et Gestion intégrée de l'Environnement (MSGIE), pour ses contributions tant administratives que techniques et ses conseils qu'il m'a aussi fournis.

Enfin, je ne peux pas terminer sans exprimer ma reconnaissance à tous mes voisins, à tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la réalisation de ce travail, je dis un grand merci.

RESUME

La dégradation des eaux de surface ou donc leur pollution cause l'indisponibilité de l'eau potable et chambarde le cycle de l'eau, ce qui gêne alors les générations futures. La qualité de l'eau du lac Tanganyika est dégradée par des eaux de plusieurs sources y compris les sources agricoles.

Dans le cadre de ce travail nous avons fait une étude sur la qualité des eaux de surfaces en milieu rizicole des zones de Maramvya et Kirekura, surtout sur les eaux de la rivière Kivogero qui est un autre cours d'eau se jetant dans la rivière Mutimbuzi après les rivières Murago et Gikoma. Dans ces zones, qui aujourd'hui considérée comme semi-urbaines du faite que les activités de leurs populations sont presque semblables à celles se déroulant dans les centres urbains, la partie de Bugoma est surtout occupée par la culture du riz. Pour arriver aux résultats, les méthodes d'analyses standards ont été utilisées.

Les résultats obtenus ont montré que les concentrations des paramètres analysés sont élevées en période culturale par rapport à la période non culturale et que pour les échantillons prise sur les eaux de Kivogero, les valeurs des paramètres ont varié en augmentant en quittant l'amont vers l'aval. Par contre les valeurs de la concentration en oxygène dissous sur tous les sites ont varié en diminuant et ont été moins élevées en période culturale qu'en celle non culturale.

Pour les nutriments et sur tous les sites, les concentrations en azote ammoniacal dans toutes les périodes restent beaucoup supérieures à celles des autres et avec des valeurs très considérables ce qui explique la faible ou la non oxydation de cet élément en nitrites et nitrates. En partant du débit à l'embouchure de la rivière Kivogero de 0,04m^3/s en période non culturale et de 0,72m^3/s en période culturale, les calculs de la quantité par jour des nutriments envoyés vers la rivière Mutimbuzi ont donné une estimation de 263,22 kg/j et 2926,24kg/j de l'azote total dont la forme dominante est l'azote ammoniacal (163,7 kg/j et 1820,52kg/j) respectivement en période non culturale et culturale tandis que pour le phosphore total, dans ces mêmes périodes, l'estimation est de 5,86kg/j et 15,55kg/j. Ces valeurs montrent qu'en cas de la non autoépuration de la rivière Mutimbuzi pourraient être source de menace sérieuse envers les écosystèmes de la partie nord du lac Tanganyika.

Mots clés : Rivière Kivogero, qualité, eau de surface, Bugoma, milieux rizicole, pollution, évaluation, nutriments, flux.

ABSTRACT

The degradation of surface water or therefore its pollution causes the unavailability of drinking water and disrupts the water cycle, which then hampers future generations. The water quality of Lake Tanganyika is degraded by water from several sources including agricultural sources.

As part of this work we carried out a study on the quality of surface water in rice growing areas of the Maramvya and Kirekura zones, especially on the waters of the Kivogero river which is another river flowing into the Mutimbuzi River after the Murago and Gikoma Rivers. In these areas, which today are considered semi-urban because the activities of their populations are almost similar to those taking place in urban centers, the part of Bugoma is mainly occupied by rice cultivation. To arrive at the results, standard analysis methods were used.

The results obtained showed that the concentrations of the parameters analyzed are high in the cultural period compared to the non-cultural period and that for the samples taken from the waters of Kivogero, the values of the parameters varied by increasing when leaving the upstream towards the downstream. On the other hand, the values of the dissolved oxygen concentration on all sites varied while decreasing and were lower in the cultural period than in the non-cultural period.

For nutrients and on all sites, the concentrations of ammonia nitrogen in all periods remain much higher than those of the others and with very considerable values which explain the low or no oxidation of this element into nitrites and nitrates. Starting from the flow at the mouth of the Kivogero River of 0.04m3/s in the non-crop period and 0.72m3/s in the crop period, calculations of the quantity per day of nutrients sent to the Mutimbuzi River gave an estimate of 263.22 kg/d and 2926.24kg/d of total nitrogen, the dominant form of which is ammonia nitrogen (163.7 kg/d and 1820.52kg/d) respectively in the non-cultural and cultural periods while that for total phosphorus, in these same periods, the estimate is 5.86kg/d and 15.55kg/d. These values show that in the event of non-self-purification of the Mutimbuzi River could be a source of serious threat to the ecosystems of the northern part of Lake Tanganyika.

Keywords: Kivogero River, quality, surface water, Bugoma, rice-growing environments, pollution, assessment, nutrients, flows.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

DBO_5 : Demande Biochimique en oxygène pendant cinq jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nation Unis pour l'Alimentation et l'Agriculture)

ISTEEBU : Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi

MSGIE : Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement

NTU : Nephelometric Turbidity Unit (Unité Néphélométrique de Turbidité)

OBPE : Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

OMS : Organisation Mondiale de la Sante

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition sur la terre de l'eau (eau saline, eau douce et glace) souterraine et de surface 4

Figure 2: Cycle simplifié de la propagation des polluants anthropiques dans les compartiments naturels. 15

Figure 3: Carte de la zone d'étude montrant les différents sites d'échantillonnage 19

Figure 4: Photo d'illustration du premier site d'échantillonnage 20

Figure 5: Photos d'illustration du deuxième site d'échantillonnage 21

Figure 6: Photo illustrant le troisième site d'échantillonnage 21

Figure 7: Image illustrative du quatrième site d'échantillonnage 21

Figure 8: Cinquième site d'échantillonnage (Embouchure de la rivière Kivogero) 22

Figure 9: Variation du pH en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 31

Figure 10: Variation de la conductivité électrique en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 31

Figure 11: Variation des T.D.S en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 31

Figure 12: Variation de l'oxygène dissous en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 32

Figure 13: Variation de la turbidité en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 32

Figure 14: Variation de la température en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 33

Figure 15: Variation du débit en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 33

Figure 16: Variation des phosphates en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 34

Figure 17: Variation du phosphore total en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 34

Figure 18: Variation des nitrates en fonction des sites d'échantillonnage et du période de prélèvement des échantillons 35

Figure 19: Variation des ions ammonium en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 35

Figure 20: Variation des nitrites en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 35

Figure 21: Variation de la DBO_5 en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 36

Figure 22: Variation de la DCO en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 36

Figure 23: Variation des M.E.S en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons 37

Figure 24: Comparaison des charges polluantes des nutriments en période non culturale (PN-C) et en période culturale (PC)..... 39

Figure 25: Comparaison de la charge polluante de MES, DCO et DBO5 en période non culturale (PN-C) et en période culturale (PC)..... 40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classement des eaux de surface stagnantes et courantes d'après leur qualité..... 6

Tableau 2: Critères d'appréciation globale de la qualité d'eau des rivières. 7

Tableau 3: Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité générale des cours d'eau..... 14

Tableau 4: Les coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage..... 18

Tableau 5: Résumé de la méthodologie utilisée, le matériel et références..... 25

Tableau 6: Valeurs moyennes des paramètres mesurés in situ en fonction de la période de prélèvement 29

Tableau 7: Valeurs moyennes des paramètres analysés au laboratoire en fonction de la période de prélèvement. 29

Tableau 8: Résultats de l'estimation des flux en nutriments en kg/j apportés par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période non culturale..... 38

Tableau 9: Résultats de l'estimation des flux en nutriments apportés par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période culturale 38

Tableau 10: Résultats d'estimation des flux en azote total (NT) 38

Tableau 11: Résultats de l'estimation des flux en MES, DBO_5 et DCO apportées par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période non culturale..... 40

Tableau 12: Résultats de l'estimation des flux en MES, DCO et DBO_5 en kg/j apportées par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période culturale 40

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i

REMERCIEMENTS ii

RESUME iii

ABSTRACT iv

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS v

LISTE DES FIGURES vi

LISTE DES TABLEAUX viii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES EAUX DE SURFACE DANS UN MILIEU ANTHROPISE 3

I.1.Introduction 3

I.2. Eaux de surface 3

I.2.1. Les caractéristiques des eaux de surface 5

I.2.2. Qualités des eaux de surface 5

I.2.3. Description de quelques paramètres physico-chimiques considérés lors de l'évaluation de la qualité des eaux de surfaces 7

I.2.4. Importance des eaux de surface 12

I.2.5. Pollution des eaux de surface 12

I.2.6. Conséquences de la pollution des eaux de surface 14

I.3. Anthropisation 15

I.3.1. Raisons qui poussent à l'anthropisation 16

I.3.2. Conséquences de l'anthropisation 17

I.3.3. La pollution anthropique des eaux de surface au Burundi 17

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES 18

II.1. Description de la Zone d'étude 18

II.2. Caractérisation du milieu environnant chaque site d'échantillonnage 20

II.3. Critères de choix des sites d'échantillonnage 22

II.3. Méthodologie 23
II.3.1. Prélèvement et transport des échantillons 23
II.3.2. Mesures et analyses des paramètres physico-chimiques 24
II.3.2.1. Mesures in-situ. 24
II.3.2.2. Matériel et méthodes d'analyse au laboratoire 25
II.3.3. Traitement des données 27
CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS 28
III.1. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS 28
III.1.1 Paramètres mesurés aux différents sites 28
III.1.2. Variation saisonnière des paramètres 30
III.1.2.1. Variation spatio-temporelle des paramètres mesurés in situ 30
III.1.2.2. Variation spatio-temporelle des paramètres analysés au laboratoire 34
III.1.2 Charges polluantes envoyées dans la rivière Mutimbuzi par les eaux de Kivogero 37
III.1.2.1 Charges polluantes en nutriments 38
III.1.2.2 Charges polluantes en MES, DBO_5 et DCO 40
III.2. DISCUSSION DES RESULTATS 41
CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS 44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 46
WEBOGRAPHIE 52
ANNEXES 53

AVANT-PROPOS

Ce mémoire rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Sciences et Gestion Intégrée de l'Environnement, spécialité Eau et Assainissement. Il évalue la qualité des eaux de surface en milieu rizicole, notamment les eaux de la rivière Kivogero qui est l'une des affluents de la rivière Mutimbuzi séparant la zone Maramvya de la zone Kirekura tout juste dans la partie des champs rizicoles de Bugoma 1 en commune Mutimbuzi de la province de BUJUMBURA.

Les pratiques agricoles, lorsqu'elles ne sont pas bien gérées, peuvent être à l'origine de la pollution des eaux de surface, ce qui dégrade alors les écosystèmes aquatiques d'où extinction de certaines espèces et l'invasion de certaines autres exotiques ou tout simplement la perte de la biodiversité aquatique.

Cette étude se veut être une contribution à la gestion durable des ressources en eaux de surface, elle évalue les charges polluantes apportées par la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi et classe les eaux de la rivière Kivogero selon les grilles d'évaluation de la qualité des eaux d'une rivière.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource importante pour le maintien de toute forme de vie sur terre et qui nécessite en retour une protection de tout le monde. Etant le fondement de la vie et des équilibres écologiques, l'eau est à la fois un aliment, un médicament, une matière première industrielle, énergétique et agricole ainsi qu'un moyen de transport (Festy *et al.*, 2003).

L'évaluation de la qualité de l'eau est importante pour déterminer dans quelle mesure elle est saine pour boire, nager ou soutenir un écosystème. Mais aussi cette évaluation permet, le cas échéant, de connaitre le type de traitement nécessaire et la technologie à utiliser.

Les activités anthropiques rendent parfois indisponible cette eau à travers la pollution ou autre dégradation de sa qualité, ce qui peut constituer un obstacle pour la disponibilité de l'eau pour les générations futures. La présence des macropolluants et micropolluants dans les eaux de surface dégrade leur qualité et compromet la santé de la population utilisatrice de ces eaux et organismes aquatiques (Adjagodo *et al*., 2016).

Parmi les activités de l'homme, celles liées à l'agriculture constituent la principale cause de la pollution de l'eau dans de nombreux pays (FAO, 2023). Quelques fois, les agriculteurs ignorent souvent les risques que présentent les agents actifs (engrais, pesticides,...) qu'ils utilisent. Or, selon Mateo-Sagasta (2020), l'intensification de l'agriculture conduit à la contamination des cours d'eau, les lacs, les aquifères et les eaux côtières. Les milieux rizicoles entrent aussi dans cette optique de dégradation des milieux aquatiques. La culture du riz demande beaucoup d'eau pour l'irrigation et cette eau, après son utilisation, est éliminée vers les cours d'eau qui sont proches en aval.

Le Burundi étant un pays dont plus de la moitié de la population vit de l'agriculture, la riziculture est principalement pratiquée dans la plaine de l'Imbo et dans les marais de moyenne altitude (Gahiro, 2011)**.** D'après cet auteur, dans la plaine de l'imbo, la culture du riz s'accompagne des pratiques d'irrigation d'où alors la riziculture irriguée. Par ailleurs, les eaux de certaines rivières qui traversent les milieux rizicoles sont déviées pour l'irrigation, c'est le cas notamment des rivières Muzazi, Mpanda, Musenyi, Kivogero. Ces eaux coulent dans les champs et reviennent ensuite dans les mêmes rivières en aval. Il convient de signaler que ces rivières constituent les affluents du lac Tanganyika, un lac qui constitue une source importante d'approvisionnement en eau potable de la ville de Bujumbura et qui abrite une biodiversité élevée d'espèces animales dont le poisson. Selon Nusura *et al*. (2013)**,** la plupart des pratiques rizicoles en vigueur dans ces régions de basse et de moyenne altitude du Burundi présentent sur le plan environnemental des dangers dont on ne peut pas faire fi**.** Un apport excessif des

nutriments aux écosystèmes aquatiques influence la composition de l'eau des milieux à faible courant, ce qui favorise une prolifération d'algues et de végétaux pouvant conduire à l'eutrophisation.

La rivière Kivogero qui fait objet de cette étude, traverse plusieurs champs rizicoles vers la partie couramment appelée BUGOMA (Selon les villageois de Maramvya) et finit par se jeter dans la rivière Mutimbuzi, laquelle rivière s'achemine directement vers le lac Tanganyika. La connectivité de ces deux rivières donne une raison de penser que les éléments véhiculés dans l'eau de la rivière kivogero pourraient rejoindre le lac Tanganyika via la rivière Mutimbuzi. Or, la plupart des riziculteurs de cette partie utilisent des engrais à base du phosphore, d'azote et de potassium comme fertilisants organo-minéraux susceptibles de favoriser l'eutrophisation.

Etant donné que la rivière Kivogero traverse les milieux agricoles potentiellement pollués (les champs rizicoles de Bugoma) et qu'elle se jette dans une rivière affluent du lac Tanganyika, lequel lac constitue un réservoir d'eau pour la consommation humaine et comme habitat d'une grande biodiversité, on peut se poser la question suivante: « Est-ce que les nutriments apportés par les fertilisants aux champs rizicoles de Bugoma sont-ils tous absorbés par les plantes ou une certaine quantité se retrouve dans les rivières en aval ?».

L'objectif général de cette étude est de contribuer à la gestion durable des ressources en eaux de surface. Les objectifs spécifiques sont les suivants:

- Déterminer les paramètres physico-chimiques des eaux de la rivière Kivogero ;
- Evaluer les charges polluantes apportées par la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi ;
- Classer les eaux de la rivière Kivogero selon les grilles d'évaluation de la qualité des eaux d'une rivière.

Ce mémoire, en plus d'une introduction générale et d'une conclusion générale, comprend trois chapitres ; le premier constitue une revue de la littérature sur la qualité des eaux de surface, le deuxième décrit la méthodologie et le matériel utilisés pour la réalisation de ce travail et enfin le dernier chapitre concerne les résultats et leur discussion.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES EAUX DE SURFACE DANS UN MILIEU ANTHROPISE

I.1.Introduction

Dans ce premier chapitre, il sera présenté d'une part, ce que c'est une eau de surface et d'autre part, ce que c'est un milieu anthropisé. On insistera beaucoup plus sur les paramètres physico-chimiques à tenir en considération pour la détermination de la qualité de l'eau de surface. Ensuite, après avoir défini une anthropisation, on abordera son impact sur la qualité de l'eau de surface en général et surtout l'impact issu du domaine de l'agriculture en particulier.

I.2. Eaux de surface

Le terme « eaux de surface» englobe la pluie, les écoulements et les eaux stockées dans les lagunes (Le Barbé *et al*., 1993).

Les eaux de surface regroupent toutes les eaux s'écoulant à la surface du sol, des versants jusqu'aux cours d'eau, en passant par les mares, les étangs et les lacs (Rassou, 2009).

D'après la loi n^{o} 1/02 du 26 mars 2012 portant le code de l'eau au Burundi, l'eau de surface est définie comme étant toutes les eaux qui s'écoulent ou stagnent à la surface terrestre. Cette définition est similaire à celle trouvée sur le site https://www.suezwaterhandbook.fr/eau-et-generalites/quelles-eaux-a-traiter-pourquoi/les-eaux-naturelles/les-eaux-de-surface, consulté le 13 avril 2024 à 13h 24 min, disant que les eaux de surface englobe toutes les eaux circulant ou stockées à la surface des continents.

Ce même site précise que les eaux de surface ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement et que ces dernières se rassemblent en cours d'eau (ruisseaux, rivières et fleuves), caractérisés par une vitesse de circulation appréciable ou peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs, zones humides, estuaires, océans et mers) ou artificielles (retenues de barrages, plans d'eau, réservoirs, lagunes) où peut apparaitre une grande hétérogénéité de la qualité selon la profondeur.

Cette dernière définition se ressemble à celle figurant dans l'article 2 du Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, 2000.

Cet article définit les eaux de surface comme étant les eaux intérieures, à l'exception des eaux souterraines, les eaux de transition et les eaux côtières, sauf en ce qui concerne leur état chimique, pour lequel les eaux territoriales sont également incluses.

En réunissant toutes ces définitions, on peut alors définir l'eau de surface comme étant toute eau produite par des ruissellements générés par les précipitations ou l'affleurement des eaux souterraines, qui s'écoule ou stagne à la surface de l'écorce terrestre. Il s'agit notamment des eaux intérieures à l'exception des eaux souterraines, des eaux de transition et des eaux côtières, et en ce qui concerne leur état chimique, les eaux territoriales (Environnement Bruxelles, 2020)**.**

En bref, les eaux superficielles rassemblent toutes les eaux présentes sous forme liquide à la surface de la Terre.

L'eau de surface ou encore eau superficielle peut être douce, saumâtre ou salée selon son emplacement. Ainsi, l'eau de surface douce se répartit dans les lacs, les rivières et les marais tandis que l'eau saline se trouve dans les Océans (Environnement Canada, 2006)**.**FAO (2002) souligne que l'eau douce utilisable provient essentiellement des précipitations qui tombent sur le continent au cours du cycle hydrologique.

Selon Roussel *et al.* (2017)**,** la répartition sur la terre de l'eau (eau saline, eau douce et glace) souterraine et de surface est telle que 97 % de l'eau mondiale (1,3 milliard de milliards de m^3) est salée. Les 3 % qui restent sont de l'eau douce, dont 68 % sont constitués de glace. Ces chiffres sont similaires à ceux donnés par FAO (2002) sur les ressources mondiales en eau et agriculture.

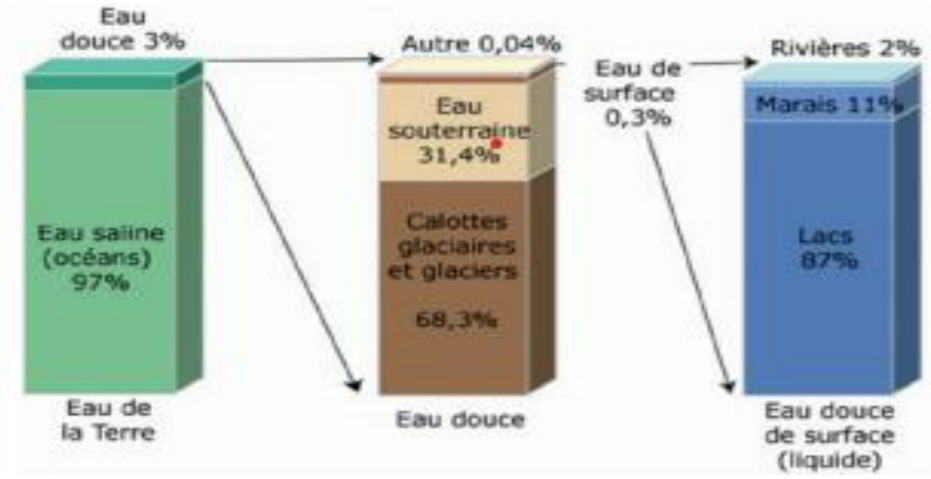


Figure 1: Répartition sur la terre de l'eau (eau saline, eau douce et glace) souterraine et de surface (Roussel *et al.,* 2017)

L'eau douce « utile » pour les besoins des écosystèmes terrestres et des activités humaines a selon (Ducharne & Laval, 2015) deux composantes majeures. D'après cet auteur, la première est l'humidité des sols, souvent appelée « eau verte », car elle alimente la transpiration des plantes, couplée par la photosynthèse à leur production de biomasse et la seconde constitue les « eaux

bleues », qui s'écoulent sous forme liquide dans les bassins versants, au sein des cours d'eau, lacs, et dans les roches aquifères.

I.2.1. Les caractéristiques des eaux de surface

Les eaux de surface présentent des caractéristiques qui sont toutefois variables suivant l'environnement géologique, les saisons, le climat et les rejets polluants provenant des activités anthropiques. En effet, elles contiennent souvent beaucoup de matières naturelles en suspension ainsi que des substances dissoutes qui varient selon la pluviométrie et la qualité géologique des reliefs qui l'entourent. Le site https://www.cieau.com/connaitre-leau/leau-dans-la-nature/les-eaux-de-surface-des-ressources-protegees-controlees-et-de-bonne-qualite/, visité le 27 novembre 2023 précise que la composition minérale des eaux de surface varie :

- Suivant le terrain sur lequel elles évoluent ;
- La pluviométrie ;
- Les rejets polluants provenant des activités humaines.

Comme l'indiquent Livingstone (1991) et Villeneuve *et al*., (2007), la plupart des eaux de surface sont naturellement riches en oxygène et pauvres en dioxyde de carbone.

Par ailleurs, les matières en suspension et en solution peuvent contenir des effluents polluants qui empêchent l'utilisation des eaux de surface à l'état brut à des fins domestiques ou industrielles. C'est ainsi qu'elles doivent subir des traitements de potabilisation avant d'être utilisée pour toute activité humaine (agricole, industrielle, domestique). Si leur qualité est véritablement trop dégradée, elles sont écartées de toute utilisation (MAES, 2007).

I.2.2. Qualités des eaux de surface

Pour évaluer la qualité de l'eau dans les rivières, les lacs et les zones humides, on examine généralement un certain nombre de caractéristiques de l'eau, comprenant notamment les **propriétés physiques** (telles que le pH, la clarté et la température de l'eau), la concentration de diverses **substances chimiques** (y compris les nutriments, les métaux, les minéraux et les polluants provenant de l'activité humaine), ainsi que les **caractéristiques biologiques** (comme la quantité et les types d'insectes, de bactéries, d'algues et d'autres organismes qui vivent dans l'eau) (Korderas & Livingstone, 2021). La qualité d'une eau est donc caractérisée par les diverses substances qu'elle contient. C'est la concentration de ces différents éléments qui détermine la qualité d'une eau et permet de savoir si celle-ci convient à un usage particulier (Hébert & Légaré, 2000).

Selon Meybeck (1986), la charge en éléments majeurs dissous d'un cours d'eau dépend des caractéristiques lithologiques du bassin versant qui le draine, des activités anthropiques qui s'y déroulent, mais également de la proximité des eaux marines. On détermine alors la qualité de l'eau d'après sa concentration en composés chimiques, particules minérales et organiques. La qualité de l'eau dépend donc des facteurs naturels (sol, sous-sol, etc.) et humains (agricole, industrielle et domestique) produisant des rejets qui se retrouvent directement ou indirectement dans les milieux aquatiques. De là, quelques paramètres physico-chimiques sont à considérer lors de l'évaluation de la qualité des eaux de surfaces (Wasson, 2001). Il s'agit notamment de :

- La température de l'eau
- Le bilan de l'oxygène
- La teneur en sels
- Etat d'acidification
- Concentration en nutriments et autres matières organiques
- La présence ou non de divers polluants

La qualité de l'eau dans les cours d'eau et les lacs varie avec la saison et l'endroit, même en l'absence de pollution. Aucun paramètre ne permet de déterminer à lui seul la qualité de l'eau. Ainsi, L'appréciation de la qualité des eaux de surface se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques et chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'eau (Squilbin & Yourassowsky, 2005).

Les eaux de surface stagnantes et courantes peuvent être classées selon leur qualité en suivant certains paramètres physico-chimiques. Le tableau suivant est un exemple pour quelques paramètres.

Tableau 1: Classement des eaux de surface stagnantes et courantes d'après leur qualité (Bliefert & Perraud, 2001).

Classe de qualité	**Conductivité (en µS/cm)**	**Taux de saturation en O_2 (%)**	**O_2 dissous en mg/l**	**DBO_5 (mg/)**	**DCO (mg/l)**	**Qualité de l'eau**
1A	≤ 400	≥ 90	≥ 7	≥ 3	≥ 20	Excellente
1B	400….750	70…..90	5 ….7	3….5	20….25	Bonne
2	750….1500	50……70	3….5	5….10	25…..40	Moyenne
3	1500…. 3000	< 50	< 3	10….25	40……80	Médiocre
4	≥ 3000	-	-	> 25	> 80	Hors classe

Un autre exemple similaire est celui de Degrémont (1989) sur les critères d'appréciation globale de la qualité d'eau des rivières.

Tableau 2: Critères d'appréciation globale de la qualité d'eau des rivières (Degrémont 1989).

Classe de qualité	**Conductivité**	**Température**	**pH**	**MES (mg/l)**	**Oxygène dissous (mg/l)**	**NH_4^+ (mg /l)**	**NO_3^- (mg/l)**
1A	≤ 400	≤ 20	6,5 -8,5	≤ 30	>7	≤ 0,1	-
1B	400– 750	20 - 22	6,5-8,5	≤ 30	5 - 7	0,1- 0,5	-
2	750– 1500	22 - 25	6 - 9	≤ 30	3 - 5	0,5 - 2	< 44
3	1500- 3000	25 - 30	5,5 -9,5	30 - 70	1- 3	2 -8	44-100
HC	> 3000	> 30	> 9,5	> 70	< 1	> 8	> 100

Classe 1 A: bonne qualité absence de pollution, **Classe 1 B**: qualité bonne- pollution modérée, **Classe 2**: qualité moyenne- pollution nette **Classe 3:** qualité médiocre- pollution importante **Classe 4 ou HC:** qualité hors classe- pollution excessive.

I.2.3. Description de quelques paramètres physico-chimiques considérés lors de l'évaluation de la qualité des eaux de surfaces

- **pH**

C'est un paramètre qui donne des indications sur le degré d'acidité ou de basicité de l'eau. Selon Mason (1991), la présence des ions ammonium dans les eaux ont tendance à baisser le pH lorsque la matière organique azotée s'hydrolyse tandis que les ions bicarbonates ont tendance à rehausser le pH.

- **Conductivité et TDS**

D'après le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2015), La conductivité est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la température et elle est liée à la concentration et à la nature des substances dissoutes, en général, les sels minéraux. Selon ce même auteur, dans le cas des eaux fortement chargées en matière organique, la conductivité ne donnera pas forcément une idée immédiate de la charge du milieu. Dans les autres cas, elle permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation d'une eau et d'estimer le volume d'échantillon nécessaire pour certaines déterminations chimiques.

Les TDS sont une équivalence à la minéralisation totale correspondant à la somme des anions et des cations présents dans les eaux (Kambire, 2014).

- **Oxygène dissous**

L'oxygène dissous représente la quantité d'oxygène gazeux dissous dans une eau, à la température et à la pression atmosphérique, au moment du prélèvement (Rodier *et al.*, 2016). Les concentrations en oxygène dissous constituent l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux dans la mesure où il est indispensable à la vie aquatique et à la dégradation des polluants biodégradables permettant l'autoépuration (Bruxelles Environnement, 2006).

L'oxygène dissous dans l'eau diminue lorsque la température augmente, ce qui induit une diminution de la concentration en oxygène à saturation et ce phénomène peut être compensé par un apport en oxygène tel que par la photosynthèse (Villeneuve *et al.*, 2007). Or, la température influence encore le taux de consommation d'oxygène par les organismes durant le jour (effet de l'énergie solaire sur la température de l'eau). En outre, la concentration d'oxygène peut varier suite à l'ajout de la matière organique (déversements agricoles, rejets d'usines d'épuration...) et ceci augmente fortement le taux de décomposition et peut provoquer la prolifération de plantes (Livingstone, 1991).

- **Turbidité**

La turbidité représente la clarté, la limpidité ou la transparence de l'eau. Elle est une composante importante de la qualité de l'eau d'une rivière car elle est indicatrice de la présence de MES (organiques et inorganiques) dans l'eau (Manseau, 2020). Elle peut être causée par des phénomènes naturelles (inondations, ruissellements en cas de fortes pluies, morphologie du cours d'eau, etc.) mais également anthropiques (activités extractives comme mines, carrière, gravier, sable, orpaillage, …) dans le cours d'eau (Blum *et al.*, 2014).

Normalement, les eaux de surfaces peuvent être classées suivant ce paramètre en trois catégories suivantes (admin, 2022) :

- NTU < 5 => eau claire
- NTU < 30 => eau légèrement trouble
- NTU > 50 => Eau trouble.

D'après le site https://www.g3e-ewag.ca/ressources-interactives/capsules/cours-eau/physicochimie/turbidite.html, consulte le 31 janvier 2024, une forte turbidité peut provoquer

l'augmentation de la température de l'eau du fait que les rayons du soleil se reflètent sur une multitude de fines particules transportées par l'eau, ces particules se réchauffent et réchauffent ensuite le milieu environnant.

- **Température**

La température est une mesure du degré de chaleur ou de froideur de l'eau. Cela influence les types de poissons et d'insectes qui sont présents dans une rivière ou un lac (Korderas & Livingstone, 2021).

D'après ces auteurs, la température de l'eau est importante car elle peut déterminer où certaines plantes et certains animaux peuvent vivre. Elle a également une influence importante sur la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, car l'eau froide peut contenir plus d'oxygène que l'eau chaude.

Par ailleurs, la température de l'eau d'une rivière est déterminée par deux types de facteurs, à savoir les facteurs météorologiques (la température de l'air, l'intensité et la durée de la radiation solaire, la vitesse du vent à la surface et la pression de la vapeur d'eau dans l'air) et les facteurs géophysiques (la profondeur de la rivière, le débit, le degré de turbulence, les dimensions de surfaces libres et la température de l'écoulement souterrain) (Morin & Couillard, 1990).

La variation de température de l'eau peut aussi être influencée par certaines activités humaines comme (https://www.g3e-ewag.ca/ressources-interactives/capsules/cours-eau/physicochimie/temperature.html):

- le rejet d'eaux usées servant de liquide de refroidissement pour des usines ;
- la déforestation qui enlève le couvert végétal de la rivière ;
- les barrages qui modifient les caractéristiques physiques de la rivière ;
- le ruissellement de l'eau de pluie réchauffée sur le sol urbain ;
- les activités agricoles etc.

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman *et al*., 1996). De ce fait, toute variation brusque de ce paramètre entraine une perturbation dans l'équilibre de l'écosystème aquatique.

- **Débit**

Le débit d'un cours d'eau est un volume d'eau qui traverse sa section transversale pendant une unité de temps (ARFIB, 2001)

Selon le site http://www.hydro.eaufrance.fr/, consulté le 02/03/2024, à 7h27, le débit dépend des caractéristiques physiques du cours d'eau (sa pente, sa largeur, sa profondeur, etc.) et de la taille de son bassin versant, mais surtout des précipitations et de la fonte des neiges ou encore les prélèvements d'eau. Ainsi, pour un même cours d'eau, le débit augmente de la source vers l'exutoire.

- **Nutriments**

On entend souvent ici des compose phosphorés (orthophosphates et polyphosphates) et azotés (ammonium, nitrates et nitrites).

En effet, selon (Zandagba *et al*., 2016), parmi les phosphates présents dans l'eau, on distingue couramment les **orthophosphates** ($H_2PO^{4\ -}$, $HPO_4^{\ 2-}$, $PO_4^{\ 3-}$), qui sont des sels minéraux de l'acide phosphorique (H_3PO_4), les **polyphosphate**s (ou phosphates condensés), qui correspondent à des molécules plus complexes de phosphates minéraux (phosphore hydrolysable dans l'acide) et les **phosphates organiques**, qui correspondent à des molécules de phosphates associées à des molécules à bases carbonées, comme dans la matière organique vivante ou morte (animaux, végétaux, microorganismes, etc.).

En bref, dans l'eau, les phosphates inorganiques (orthophosphates et polyphosphates) et les phosphates organiques peuvent se retrouver sous formes dissoutes et/ou particulaires (associés aux particules en suspension, de sédiment, ou de sol) (Zandagba *et al*., 2016).

Les nitrates et les nitrites représentent les formes minérales oxydées de l'azote tandis que l'ammonium représente la forme minérale réduite de l'azote (Rodier *et al* 2009).

D'après (Bliefert & Perraud (2001)**,** la décomposition des matières organiques par les bactéries présentes dans l'eau libère l'azote qui se minéralise sous forme d'ammonium dissous dans l'eau. Celui-ci est se transforme plus rapidement en nitrites sous l'action de bactéries nitrifiantes (les *Nitrosomonas*), puis en nitrates par des bactéries *Nitrobacters*, toutes consommatrices d'oxygène dissous dans l'eau selon les équations suivantes :

$$NH_4^+ + \frac{3}{2}O_2 + H_2O \longrightarrow NO_2^- + 2H_3O^+ \text{ (Nitritation)}$$

$$NO_2^- + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow NO_3^- \text{ (Nitratation)}$$

Globalement, on a l'équation suivante:

$$NH_4^+ + 2O_2 + H_2O \longrightarrow 2H_3O^+ + NO_3^-$$

L’excès des concentrations dans l’eau en nutriments (composés phosphores et azotés) conduit à des situations d’eutrophisation (Ado *et al*., 2000).

- DBO

La demande biochimique en oxygène(DBO) représente la quantité d’oxygène nécessaire aux microorganismes vivants pour assurer l’oxydation et la dégradation des matières organiques présentes dans l’eau (Keddari, 2015).

La DBO_5 est la masse d'oxygène moléculaire (exprimée en mg) utilisé par les microorganismes pour dégrader en cinq jours à 20°C et à l'obscurité les matières oxydables contenues dans un litre d'eau (https://eduterre.ens-lyon.fr).

- **DCO**

La demande chimique en oxygène (DCO) représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder toute la matière organique contenue dans une eau. On obtient cette valeur en faisant réagir des échantillons d'eau avec un oxydant puissant, notamment le bichromate de potassium($K_2Cr_2O_7$) et s'exprime en milligramme d'oxygène par litre d'eau.

- **MES**

Les matières en suspension (MES) dans les eaux de surface sont des particules organiques et minérales d’origines très variées, amenées ou produites par des facteurs naturels (érosion hydrique des sols, production de plancton, décomposition de matière morte d’origine végétale ou animale...) et anthropiques (rejets d’eaux usées domestiques urbaines ou industrielles, effluents d’élevage, pratiques agricoles, etc.). Leur nature, leur concentration et les polluants éventuels qu’elles contiennent ou transportent influencent la qualité de l’eau et perturbent la vie aquatique (obstacle à la fécondation des œufs, colmatage des branchies, transparence de l’eau, etc.) (Maes, 2007).

Normalement, ce paramètre est important lors de l’étude de la qualité des eaux car les matières en suspension (MES) participent à la dégradation des écosystèmes aquatiques, par réduction de la pénétration de la lumière, détérioration des branchies des poissons, colmatage des habitats et des frayères de la faune benthique entraînant des conditions d’anoxie (Massa, 2000) et par ailleurs, comme trouvé sur le site https://www.g3e-ewag.ca/ressources-interactives/capsules/cours-eau/physicochimie/turbidite.html, les particules en suspension dans l’eau peuvent servir de support à des micro-organismes pathogènes et à des polluants (métaux lourds, pesticides, etc.).

En outre, ces M.E.S se sédimentent et s'accumulent au fond des cours d'eau, où elles rejoignent d'autres matériaux plus grossiers (cailloux, graviers, sables...). Or L'accumulation des sédiments réduit la profondeur disponible pour la navigation, accroît les risques d'inondation et fait disparaître certains biotopes aquatiques (Maes, 2007).

I.2.4. Importance des eaux de surface

L'eau est d'une importance biologique et économique capitale. Etant le fondement de la vie et des équilibres écologiques, l'eau est à la fois un aliment, éventuellement un médicament, une matière première industrielle, énergétique et agricole ainsi qu'un moyen de transport *(*Festy *et al.,* 2003).

Dans la vie quotidienne, les eaux de surface, Qu'elles soient naturelles ou artificielles, jouent un grand rôle. En effet, pour s'approvisionner en eau potable, on doit se servir des eaux de surfaces et souterraines. Dans ce cas, les eaux de surface jouent un rôle de sources potentielles de l'approvisionnement en eau potable.

Les eaux de surface participent activement au cycle de l'eau. Les grandes masses d'eau jouent un rôle sur la température et le climat local : plus la masse d'eau est importante (mer, océan) et plus le vent peut être fort. A l'inverse, les eaux superficielles de montagne, étant plus étroites, peuvent servir de barrière entre les fronts météorologiques (de Marsily, 2013). D'après cet auteur, C'est grâce à l'eau salée et à l'évaporation sur les océans, que se forme une grande partie des précipitations sur les continents qui nous alimentent en eau tous les jours

I.2.5. Pollution des eaux de surface

On entend par pollution de l'eau l'introduction de déchets industriels et institutionnels et d'autres matières nocives ou nuisibles, en quantité suffisante pour entraîner une dégradation mesurable de la qualité de l'eau (Canada, 2006).

La qualité des milieux aquatiques est fragile car elle est dégradée par de nombreux polluants, suite aux rejets d'effluents liquides, au ruissellement de l'eau de pluie sur des surfaces polluées, au lessivage de sols contaminés, et aux nombreuses autres activités anthropiques émettant des substances toxiques dans l'environnement (Perrodin, 2013).

L'expansion démographique et l'essor économique que connaissent les pays du monde sans occulter ceux de l'Afrique ont des conséquences sur l'environnement et sur les plans d'eau (Adjagodo *et al*., 2016).

A cet effet, les ressources en eau sont soumises à une forte pression exercée par l'activité anthropique (agriculture, industrie, élevage, pêche, domestique, hôpitaux, etc.). Selon Aw *et al*. (2011), les activités anthropiques à caractère socioéconomique couplées à celles des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation, ruissellement des eaux fluviales) accélèrent la dégradation des ressources en eau de surface.

Elles provoquent des perturbations de l'équilibre naturel et accroissent la charge organique de l'eau et des sédiments, puis l'encombrement des ressources en eau, avec des problèmes d'eutrophisation, l'asphyxie de l'environnement aquatique ainsi que les problèmes sanitaires des populations (Ado *et al*., 2000). D'après cet auteur, l'azote et le phosphore, lorsqu'ils sont en excès, conduisent à des situations d'eutrophisation des écosystèmes. Ces deux nutriments ont pour principale origine l'agriculture et les rejets domestiques.

Les eaux de surface sont aussi polluées par les rejets industriels d'effluents, de déchets ménagers ou agricoles, d'excrétas et divers déchets organiques (Eblin *et al.*, 2014). Selon Nguyen *et al*. (2018), ces polluants sont transportés par l'écoulement des eaux et se retrouvent dans les rivières, les cours d'eau ou les lacs. Les eaux usées domestiques et l'eau de drainage agricole causent la contamination biologique de l'eau de surface à proximité et en aval des rivières des zones peuplées.

Le ruissellement et les écoulements peu profonds de sub-surface peuvent générer le transfert d'éléments liés à l'agriculture vers les eaux de surface tels que nitrates, phosphore, produits phytosanitaires, matières en suspension. Or, ces derniers peuvent être à l'origine de la pollution des eaux (Gril *et al.*, 1999). Par ailleurs, l'intensification des cultures et le recours à certaines pratiques culturales, combinés à une utilisation excessive d'engrais et de pesticides, engendrent une dégradation des sols et augmentent les phénomènes d'érosion et de transport vers les cours d'eau de divers contaminants (Hébert & Légaré, 2000).

A partir de quelques paramètres, des grilles, qui définissent des classes de qualité des eaux de surface, existent et permettent de dire que ces dernières sont polluées ou non. Ces grilles permettent d'établir des cartes de la qualité des cours d'eau, de définir des objectifs de qualité servant de cadre pour déterminer les autorisations de rejet et l'importance des traitements à effectuer (Wasson, 2001). Ainsi, pour la qualité générale des cours d'eau, Bontoux (1993) nous a proposé la grille suivante:

Tableau 3: Grille simplifiée pour l'évaluation de la qualité générale des cours d'eau (Bontoux, 1993)

Classes	**1A**	**1B**	**2**	**3**	**HC**
DBO_5 mgO_2/l	≤ 3	de 3 à 5	de 5 à 10	de 10 à 25	> 25
DCO mgO_2/l	≤ 20	de 20 à 25	de 25 à 40	de 40 à 80	> 80
O_2 dissous mg/l	≤ 7	de 5 à 7	de 3 à 5	de 1 à 3	< 1
NH_4^+ mg/l	≤ 0,1	de 0,1 à 0,5	de 0,5 à 2	de 2 à 8	> 8
P total (mg/l)	≤ 0,2	de 0,2 à 0,5	de 0,5 à 1	de 1 à 2	>2
$PO4^{3-}$ (mg/l)	≤ 1	de 1 à 2	de 2 à 3	de 3 à 10	>10
NO_3^- (mg/l)	≤ 5	de 5 à 25	de 25 à 50	de 50 à 80	>80
NO_2^- (mg/l)	≤ 0,1	de 0,1 à 0,3	de 0,3 à 1	de 1 à 2	>2

1A : Bonne. Absence de **pollution de l'eau** significative.

1B : Assez bonne. **Pollution de l'eau** modérée.

2 : Médiocre. **Pollution de l'eau** nette.

3 : Mauvaise. **Pollution de l'eau** importante.

HC : Hors Classe. **Pollution de l'eau** très importante.

I.2.6. Conséquences de la pollution des eaux de surface

La pollution de l'eau par les activités humaines représente une importante source de coûts sociaux et économiques (Gérin *et al.*, 2003).

Les substances toxiques ont des conséquences sur l'équilibre écologique du milieu. Dans certains écosystèmes, les produits chimiques peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces animales et/ou végétales et par conséquent, entraîner le dysfonctionnement de la chaîne trophique (Gold, 2002).

Selon Dejiho *et al*. (2013), l'enrichissement du milieu aquatique augmente le métabolisme et la productivité des macrophytes et du phytoplancton. Les conséquences de la pollution sur les eaux sont la destruction des ressources vivantes, le déséquilibre des milieux physiques, biologiques et des écosystèmes aquatiques à travers l'eutrophisation, particulièrement dans les zones maritimes ou côtières (Rachid, 2010).

La pollution des eaux a également un impact sur la santé humaine, mais elle n'est pas toujours immédiate (Adjagodo *et al*., 2016). La pollution des eaux de surface pourrait encore engendrer diverses maladies telles que : choléra, typhoïde, hépatites, bilharziose et intoxications chimiques (El Ouali Lalami A., Merzouki M., El Hillali O., Maniar S., 2010). D'après l' OMS (2010), l'eau

souillée constitue un milieu propice à la transmission des maladies dans tous les pays et sur tous les continents ; du plus pauvre au plus riche, personne n'est épargné sauf que les personnes plus touchées sont des enfants de moins de cinq ans.

I.3. Anthropisation

Depuis quelques années, le terme d'anthropisation est utilisé de façon extrêmement courante dans les textes relatifs à l'impact de l'Homme sur les milieux naturels ainsi qu'au sujet du développement durable (Brun, 1997). C'est la transformation d'espaces, de paysages ou de milieux naturels par l'action de l'homme.

Le site https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4239/anthropisation, consulté le 13 février 2024, précise que le terme anthropisation est utilisé pour désigner généralement toute transformation que l'homme a sur l'environnement, soit l'urbanisation, l'agriculture, la sylviculture, l'introduction d'espèces exotiques en général, la compensation, l'exploitation minière, le câblage, la construction de routes et de ponts, le dragage de cours d'eau, la construction de barrages et de réservoirs, etc.

Selon Triplet (2015), dans son dictionnaire de la diversité biologique et de la conservation de la nature, l'anthropisation est un processus de modification des espaces naturels par les différentes actions ou activités humaines (constructions diverses, défrichements…). Aucun milieu au monde n'est exempt de la présence humaine. En effet, les activités anthropiques affectent tous les compartiments naturels, d'où leur control s'avère très important dans la protection et conservation de la nature afin de mieux atteindre un développement durable. La figure suivante montre comment les polluants d'origine anthropique se propagent dans les compartiments naturels.



Figure 2 : Cycle simplifié de la propagation des polluants anthropiques dans les compartiments naturels (http://acces.ens-lyon.fr/).

Le schéma de la figure 6 ci-haut montre comment se transfèrent les polluants d'un compartiment à l'autre et le sens de leur propagation. Il montre également d'où peuvent provenir ces polluants et que compartiment aquatique constitue leur finalité.

En effet, la pollution toxique de l'eau peut provenir des rejets ponctuels (industries, stations d'épuration urbaines,...), de rejets ponctuels dispersés (déchets toxiques en quantités dispersés) et/ou de rejets diffus moins bien connus (épandage de pesticides en agriculture, retombées de micropolluants émis dans l'atmosphère, lessivages des voies routières et autoroutières,...) (Genet *et al.*, 2010).

Ainsi, les caractéristiques des polluants vont conditionner leur migration dans le sol, sous-sol, les eaux souterraines ou les eaux de surface. Leur densité, la viscosité, la solubilité, les conditions d'équilibre entre phase liquide ou dissoute et phase vapeur et la biodégradabilité vont conditionner leur transport (http://acces.ens-lyon.fr/).

I.3.1. Raisons qui poussent à l'anthropisation

Les raisons poussant l'homme à franchir le milieu naturel en sont plusieurs mais celles liées à la recherche de la survie viennent en premiers, et par après, d'autres liées à la recherche d'un épanouissement de celui-ci, donc aux loisirs apparaissent.

En effet, l'homme va affronter le milieu naturel à la recherche de sa nourriture (agriculture, pêche, combustibles, énergie, eau, etc.), de son habitat (construction des maisons d'habitation) et de sa protection. Les ressources en eau sont fortement touchées, tant en termes de quantité que de qualité, par l'activité humaine, à savoir l'agriculture et les changements d'affectation des terres, la construction et la gestion des réservoirs, les émissions de polluants, et le traitement de l'eau et des eaux usées (Villenave *et al.*, 2013). Selon ces auteurs, l'utilisation de l'eau est principalement liée aux changements démographiques, à la consommation d'aliments (notamment le type de régime), à la politique économique (notamment la tarification de l'eau), à la technologie, au mode de vie et à la perception de la valeur des écosystèmes d'eau douce par la société.

On peut dire que l'exploitation commerciale et le loisir font partie des principales raisons poussant l'homme à affronter le milieu aquatique. Par ailleurs, selon Amara (2010), les atteintes à la biodiversité marine sont la résultante d'une démographie humaine croissante et d'une activité humaine en pleine expansion économique dont les besoins en ressources renouvelables (pêche) et non renouvelables (minérales, énergétiques) ne cessent de s'accroître.

I.3.2. Conséquences de l'anthropisation

L'homme est désormais à l'origine de plus de transformations matérielles que l'érosion, le volcanisme, la tectonique des plaques, etc. causant le dérèglement climatique, la hausse et l'acidification des océans ainsi une pollution généralisée (Bonneuil & Fressoz, 2013).

Exacerbée par le changement climatique, l'anthropisation détruit l'équilibre fragile des écosystèmes marins et de la biodiversité qu'ils renferment (Amara, 2010). Selon le même auteur, une accélération continue et rapide de l'utilisation de l'espace littoral et un accroissement des pressions sur les écosystèmes et les espèces qu'ils renferment, la pollution de la mer (dont 80 % provient des activités humaines d'origine tellurique), la navigation, l'introduction d'espèces invasives, la surexploitation des ressources halieutiques, la dégradation, la fragmentation et les pertes d'habitats sont autant de facteurs responsables de l'érosion de la biodiversité marine.

I.3.3. La pollution anthropique des eaux de surface au Burundi

Le Burundi fait face à une série de catastrophes d'origines diverses, ce qui entraine de graves conséquences pour la vie des populations et leurs moyens de subsistance (ISTEEBU, 2017). D'après cette institution, ces catastrophes sont liées aux effets naturels comme l'hydro météorologique et les épidémies ainsi qu'aux effets anthropiques notamment l'urbanisation non contrôlée, à l'exploitation anarchique des minerais et à la dégradation de l'environnement.

Dans la ville de Bujumbura, diverses industries, services et activités divers génèrent des quantités importantes de déchets en termes d'eaux usées, de déchets solides et d'émissions gazeuses constituent des sources de pollution de l'eau, des sols et de l'air (OBPE, 2021). C'est dans cette optique que plusieurs rivières sont polluées, lesquelles rivières, leurs charges vont aussi affecter les lacs.

Parmi les activités agricoles, la riziculture pourrait être classe plus dangereuse dans la pollution des eaux de surface. Par ailleurs, l'exploitation des bassins versants a selon Nusura *et al*. (2013) des conséquences environnementales qui se répercutent sur les périmètres rizicoles adjacentes. Cet auteur précise également que l'intensification de la riziculture implique l'augmentation des intrants agricoles nécessaires pour augmenter et stabiliser les rendements. Or, l'augmentation de ces intrants occasionne l'augmentation de leur concentration en milieux récepteurs d'où alors la pollution.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

II.1. Description de la Zone d'étude

L'étude a été faite dans les zones Maramvya et Kirekura, en commune MUTIMBUZI de la province de BUJUMBURA sur les eaux de la rivière Kivogero depuis son point se trouvant dans la partie appelée FODA (Figure 3), juste à quelques 100 mètres en amont de sa déviation pour l'irrigation jusqu'à son embouchure dans la partie Bugoma avant de se jeter dans la rivière MUTIMBUZI.

Au niveau de la rivière Kivogero, les échantillons ont été pris sur trois sites c'est à dire le site 1, le site 4 et le site 5. Les deux autres échantillons ont été pris sur les sites 2 et 3 localisés respectivement sur la rivière Muzazi dont la déviation sert d'irrigation des champs rizicoles de Bugoma et sur l'un des canaux d'eau d'irrigation traversant ces mêmes champs rizicoles (Figure 3), Cela en raison pour laquelle ces dernières sont canalisées pour l'irrigation des champs rizicoles de Bugoma 1, finissent par être éliminées pour rejoindre la rivière Kivogero.

La zone d'étude est localisée entre $3^{o}17'02''$ et $3^{o}18'37''$ de latitude Sud et entre $29^{o}21'58''$ et $29^{o}21'19''$ de longitude Est avec une élévation comprise entre 794 et 812 mètres d'altitude. Les coordonnées géographiques de chaque site sont mentionnées dans le tableau 4.

Tableau 4: Les coordonnées géographiques des sites d'échantillonnage

Sites	**Coordonnées géographiques**		
	Latitude	**Longitude**	**Elévation**
Site 1	$3^{o}17'02''S$	$29^{o}21'58''E$	801 m
Site 2	$3^{o}17'24''S$	$29^{o}23'01''E$	812 m
Site 3	$3^{o}18'08''S$	$29^{o}21'57''E$	798 m
Site 4	$3^{o}17'55''S$	$29^{o}21'52''E$	797 m
Site 5	$3^{o}18'37''S$	$29^{o}21'19''E$	794 m

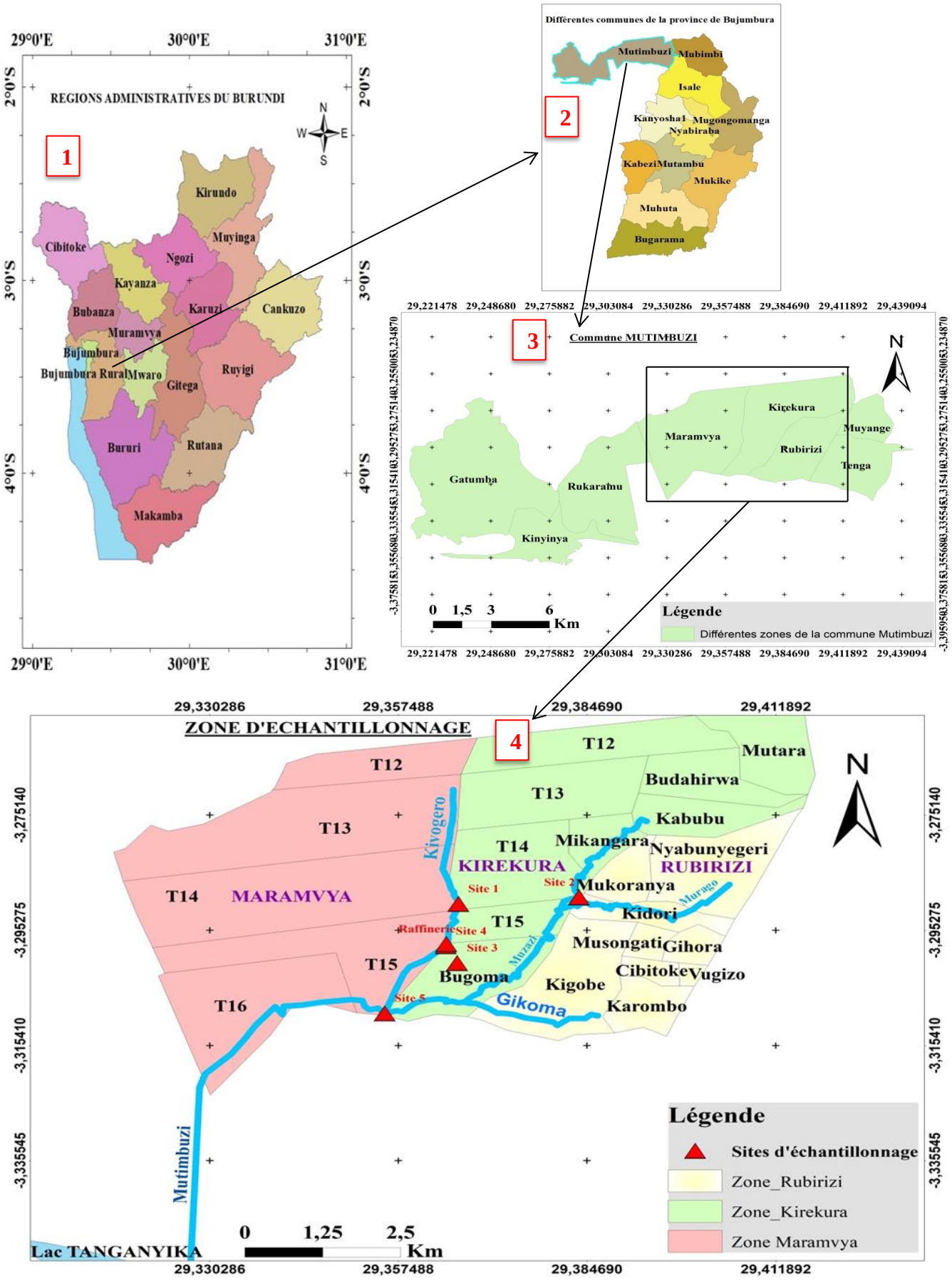


Figure 3: Carte de la zone d'étude montrant les différents sites d'échantillonnage

II.2. Caractérisation du milieu environnant chaque site d'échantillonnage

Dans l'ensemble, les eaux de la rivière Kivogero traversent un une zone à activité agricole intense depuis l'amont à Kabamba en commune Mpanda de la province BUBANZA jusqu'à l'aval dans la partie Bugoma sur la rivière Mutimbuzi. La riziculture constitue la pratique agricole la plus dominante pendant la période pluvieuse tandis que la fabrication des briques remplace cette dernière en période sèche.

A part la riziculture, on observe de part et d'autre de cette rivière, dans la partie dite FODA, des plantations de palmier à l'huile (Figure 4) ainsi que des étangs dont la plupart sont envahis par des jacinthes d'eau. A noter que certains de ces étangs sont utilisés pour l'élevage des poissons.

Le premier site est entourée de plusieurs plantations de palmier à l'huile tant en période sèche qu'en période pluvieuse.

Le sol est, en saison sèche, presque nu et l'activité en abondance y est la fabrication des briques cuites tandis qu'on observe une couverture végétale en période pluvieuse avec plusieurs champs de culture de maïs, de haricot et de riz ainsi que beaucoup de plantations de palmier à l'huile.

Quelque fois on observe des personnes qui se baignent dans cette eau, d'autres qui lavent leurs linges en utilisant cette même eau. La figure 4 ci-dessous représente une photo d'illustration du premier site d'échantillonnage.



Figure 4: Photo d'illustration du premier site d'échantillonnage

On observe sur le deuxième site, pendant toutes les saisons une couverture végétale sur les bords de la rivière et les activités d'extraction du sable et du gravier. Les bordures sont démolies du fait des écoulements plus forts qui surviennent lorsqu'il pleut en grande quantité. Sur ce site, les cultures les plus observées tout autour sont les mêmes que celles vues au premier site.

On observe également des personnes, surtout les enfants qui se baignent dans ces eaux. La figure 5 illustre le deuxième site d'échantillonnage.



Figure 5: Photos d'illustration du deuxième site d'échantillonnage

Le troisième site étant situé entre des champs purement rizicoles, on y observe tout autour des plantations de riz pendant la période pluvieuse dite aussi culturale tandis que le sol est tout nu pendant la période sèche ou non culturale. On n'y observe aucun arbre et le soleil est frappant en période sèche, ce qui cause un tarissement rapide des eaux de surface sur ce site et pour ce fait, il n'y a pas d'activités dans ce temps à cause du problème de manque d'eau. La figure 6 ci-dessous illustre le troisième site d'échantillonnage.



Figure 6: Photo illustrant le troisième site d'échantillonnage

Autour du quatrième site, on observe d'une part sur l'une des bords au long de la rivière kivogero des palmiers à l'huile, des champs rizicole de la partie Bugoma et d'autre part les champs de cultures autre que le riz. En amont de ce site se trouve une raffinerie de l'huile de palme. La figure 7 ci-dessous est une illustration du quatrième site d'échantillonnage.



Figure 7: Image illustrative du quatrième site d'échantillonnage

Le cinquième site constitue l'aval de la rivière kivogero et se trouve entre les champs rizicoles de Bugoma et ceux de Maramvya. Les eaux sur ce site se jettent directement dans la rivière

Mutimbuzi. Les bords sur l'embouchure sont en destruction progressive à cause la rigidité du sol et des écoulements qui, quelque fois deviennent plus forte. Cela a pour conséquence l'accroissement de la largeur de la rivière ainsi que le transport de plusieurs éléments y compris les boues et les matières en suspension dans l'eau de la rivière Mutimbuzi. La figure 8 illustre le cinquième site d'échantillonnage.



Figure 8: Cinquième site d'échantillonnage (Embouchure de la rivière Kivogero)

II.3. Critères de choix des sites d'échantillonnage

Les sites d'échantillonnage ont été choisis compte tenu de leur accessibilité et de leur emplacement par rapport aux champs rizicoles de Bugoma. Selon l'emplacement, les sites 1 et 2 se trouvent en amont des champs rizicoles, ils ont été choisis pour vérifier la qualité considérée comme initiale des eaux avant que ces dernières traversent les champs rizicoles.

Le site 3 a été choisi suivant qu'il se trouve entre les bandes de champs rizicoles, il a été choisi pour vérifier si réellement les eaux issues des cultures de riz sont chargées ou non en matière organique. Le site 4 se trouve entre les sites 1 et 5, il a été choisi pour suivre l'évolution spatiale des concentrations en différents paramètres considérées dans cette étude.

Le site 5 est le plus en aval par rapport aux autres sites, il se trouve sur l'embouchure de la rivière Kivogero. Il a été choisi dans le but d'estimer la quantité de matière organique envoyée par cette rivière dans celle de Mutimbuzi.

II.3. Méthodologie

Pendant la période non culturale, trois échantillonnages ont été effectués. Le premier échantillonnage a été effectué en date du 13 juillet 2023 sur cinq sites dont trois sur la rivière kivogero (**Site 1**= Amont du barrage de déviation des eaux de kivogero, **Site 4**= milieu et **Site 5**= aval ou l'embouchure), un sur les eaux déviées de la rivière Muzazi pour l'irrigation des champs rizicole de Bugoma (= **Site 2**) et un à l'intérieur des bandes de culture de riz de Bugoma (= **Site 3**). Les deuxième et troisième échantillonnages ont été effectués respectivement en date du 24 Août 2023 sur les mêmes sites que le premier.

La période culturale a commencé avec le quatrième échantillonnage et a pris fin avec le neuvième échantillonnage et les échantillons ont été pris sur les mêmes sites afin de continuer à suivre l'évolution. Elle a connu six échantillonnages dont trois premiers effectués avant l'épandage d'engrais et trois autres après.

Les dates pour les six derniers échantillonnages sont respectivement le 12/10/2023, le 26/10/2023, le 14/11/2023, 07/12/2023, le 21/12/2023 et le 26/12/2023.

II.3.1. Prélèvement et transport des échantillons

Les échantillons a été pris à l'aide des flacons en plastique de capacité d'un litre et demi chacun.

Le prélèvement des échantillons a été fait en respectant les étapes suivantes (Légaré, 2000 & Rodier *et al*., 2009) **:**

- Les échantillons ont été pris au centre de la rivière toujours en immergeant les flacons sous la surface de l'eau et en faisant face au courant (sens contraire de celui de l'écoulement);
- Les flacons ont été rincés trois fois avec l'eau de la rivière avant son prélèvement afin d'éliminer toute trace éventuelle de contaminant ;
- Chaque flacon a été étiqueté ;
- Le fond de la rivière n'a jamais été touché afin d'éviter de mettre en suspension des particules de sédiments qui risquent de contaminer l'échantillon ;
- Une fois l'échantillon prélevé, le bouchon du flacon a été vissé hermétiquement;
- Les échantillons étaient chaque fois transportés dans des glacières (à 4°C) jusqu'au lieu des analyses.
- Les analyses ont été effectuées au lendemain du jour de l'échantillonnage.

II.3.2. Mesures et analyses des paramètres physico-chimiques

II.3.2.1. Mesures *in-situ*.

Les mesures ***in situ*** ont concerné le pH, la conductivité électrique(C.E), l'oxygène dissous, la turbidité, les solides totaux dissous (TDS), le débit ainsi que la température.

Les mesures du pH, de la conductivité électrique et des TDS ont été prises à l'aide d'un appareil multisonde de marque Consort C6010, utilisant ainsi plusieurs électrodes spécifiques tel qu'il est décrit dans la norme NF EN ISO 10523 :2008. La température a été mesurée avec un appareil multi paramètres de type HANNA (**HI98129**) conformément aux normes EN 50081-1 et EN 50082-1. La turbidité a été mesurée selon la norme ISO 7027-1:2016 à l'aide d'un turbidimètre portable de la marque **Hach 2100p**. En effet, après avoir homogénéisé, un volume de 10ml d'eau brute a été introduit dans un tube et a été placé dans l'appareil, la valeur de la turbidité a été ainsi lue sur l'écran du turbidimètre.

L'oxygène dissous a été mesuré suivant les normes EN 50081-1 et EN 50082-1 avec l'oxymètre, multi paramètre de la marque HI98194 (**pH /EC/DO Multiparameter**).

- **Mesure du débit**

Le débit a été estimé en utilisant la méthode de jaugeage au flotteur telle que décrite par Rodier *et al.* (2009).

Une distance de dix mètres a été délimitée le long de la rivière, le flotteur y a été injecté et le chronomètre a directement été mis en marche afin de calculer la vitesse maximale (V_{max}) d'écoulement à la surface de l'eau. Cette distance a été nommée « **X** » et « **t** » le temps total chronométré.

La vitesse a été donnée par la formule $\mathbf{V_{max}} = \frac{X}{t\,(s)}$ et le débit est donc donné en effectuant le calcul suivant :

$\mathbf{Q = 2/3\ V_{max}\ x\ L\ x\ P_m}$ (Rodier *et al.*, 2009)

Avec V_{max} = vitesse maximale de surface

L = largeur utile (coulante)

P_m = profondeur moyenne.

Le débit nous a aidé à déterminer la charge polluante qui est calculée à partir de la relation suivante :

$$F(kg/j) = \mathbf{Q \times C}$$ (Labbardi et Arjdal, 2015)

Avec **F** : Flux en kg/j

Q : Débit en m^3/j

C : Concentration en kg/m^3

II.3.2.2. Matériel et méthodes d'analyse au laboratoire

Le tableau suivant montre les paramètres analysés au laboratoire, la méthode utilisée, l'appareil de mesure et la référence de la méthode.

Tableau 5: Résumé de la méthodologie utilisée, le matériel et références

Paramètres	Méthodes	Appareils de mesure	Normes et Références
Phosphates	Photométrie	Spectrophotomètre JENWAY 6705/Vis	NF EN ISO 6878, (avril 2005) et AFNOR NF T 90 023 (Arnold *et al*., 1992)
Nitrates	Photométrie	Spectrophotomètre JENWAY 6705/Vis	ISO 7890-3 du décembre 1998 (Rodier *et al*., 2009)
Nitrites	Photométrie	Spectrophotomètre JENWAY 6705/Vis	NFT EN 26777 du mai 1993 (classement T90-013) (Rodier *et al*., 2009)
Ammonium	Photométrie	Spectrophotomètre JENWAY 6705/Vis	AFNOR NF T90-015-2 (janvier 2000) (Rodier *et al*., 2009)
P. total	Photométrie (**HACH 8190)**	Spectrophotomètre Hach DR2800	NF EN ISO 6878, (avril 2005) et AFNOR NF T 90 023) (Hach Company, 2004)
DBO	Respirométrie (Manométrie)	BODTak II	NF EN 1899-2 (mai 1998) (Hach Company, 2010)
DCO	Photométrie après digestion au réacteur (**hach Méthode 8000**)	Spectrophotomètre Hach DR2800	ISO 15705:2002 (Arnold *et al*., 1992)
M.E.S	Filtration sur une membrane en fibre	Etuve séchant	AFNOR, NF T90-105 (Arnold *et al*., 1992)

- **Détermination des phosphates**

Les phosphates ont été déterminés par photométrie à l'aide du spectrophotomètre de la marque JENWAY 6705/Vis en suivant le protocole trouvé sur http://eduterre.ens-lyon.fr, élaboré tout en respectant la norme NF EN ISO 6878, (**avril 2005**) avec indice de classement T90-023 (norme AFNOR NF T 90 023).

- **Détermination de l'azote nitrique et des nitrates**

Ces éléments ont été dosés par la méthode de spectrométrie d'absorption moléculaire telle qu'elle est décrite par (Rodier *et al*., 2009) en suivant la norme ISO 7890-3 du décembre 1998.

Les résultats en ions nitrates (NO_3^-) ont été obtenus par conversion en multipliant les valeurs de l'azote nitrique ($N\text{-}NO_3^-$) par 4,43.

❖ **Détermination des nitrites et de l'azote nitreux**

Les nitrites ont été dosés par spectrométrie d'absorption moléculaire selon la norme NFT EN 26777 du mai 1993 sous l'indice de classement T90-013. L'azote nitreux ($N\text{-}NO_2^-$) a été obtenu par conversion de la valeur de l'ion nitrite (NO_2^-) suivant le facteur 0,304 qui a été calculé au préalable à partir de la masse atomique de l'azote.

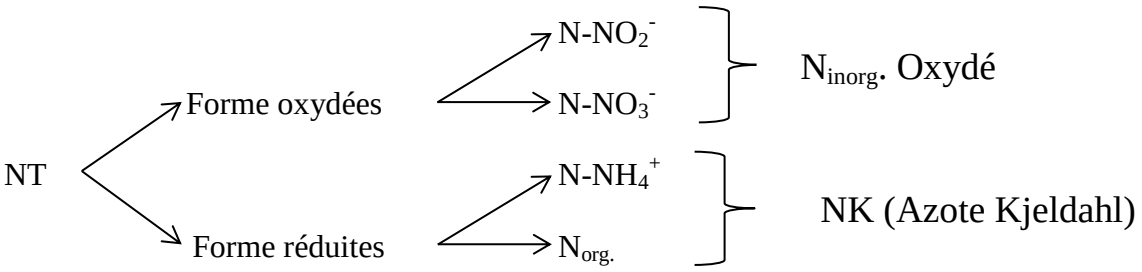
❖ **Détermination de l'azote ammoniacal et l'ammonium** (Rodier *et al*., 2009)

L'azote ammoniacal et l'ammonium ont été déterminés par spectrophotométrie en utilisant la méthode de Nesslerisation directe en suivant la norme AFNOR NF T90-015-2 (janvier 2000). Les valeurs de l'ion ammonium (NH_4^+) ont été calculées en multipliant celles de l'azote ammoniacal ($N\text{-}NH_4^+$) par 1,22. A noter que ce facteurs est mentionné dans le protocole d'analyse utilisé tels qu'il est décrit par Rodier *et al*. (2009)**.**

A partir des résultats de flux en N-NO3-, N-NO2- et N-NH4+, on a à la suite pu calculer les quantités de l'azote organique et celles de l'azote total envoyées journalièrement par la rivière Kivogero dans la rivière Mutimuzi.

Normalement, les nitrates constituent la composante principale de l'azote inorganique (**$N_{inorg.}$**) ou minéral, lui-même inclus majoritairement dans l'azote total (**NT**) avec une autre composante, l'azote organique (**$N_{org.}$**) (Rodier *et al*., 2009) :

$N_{inorg.} = N\text{-}NH_4^+ + N\text{-}NO_3^- + N\text{-}NO_2^- = NT - N_{org.}$



En effet, dans les eaux des rivières, l'azote organique représente 60 % de l'azote inorganique dissous c'est-à-dire $N\text{-}NH_4^+ + N\text{-}NO_2^- + N\text{-}NO_3^-$ (Bronk, 2002).

❖ **Détermination des Matières en suspension (M.E.S)**

En se référant sur la norme AFNOR, NF T90-105, les matières en suspension ont été déterminées par filtration sur une membrane filtrante en fibres de verre de 0,47μ_m de diamètre.

- **Dosage du phosphore total**

Le phosphore total a été dosé par photométrie à l'aide des réactifs pré-dosés en utilisant l'une des méthodes standards de l'American Public Health Association (**APHA**),notamment la méthode **HACH 8190** qui est une méthode par digestion en présence du persulfate de potassium et en milieu acide (Hach Company, 2004).

- **Analyse de la Demande Chimique en Oxygène (DCO)**

Comme le phosphore total, la DCO a été aussi analyse colorimétriquement, avec des réactifs pré-dosés, selon les méthodes standards de l'APHA (Arnold *et al*., 1992), précisément avec la méthode de digestion au réacteur (hach Méthode 8000)

- **Analyse de la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5)**

La demande biochimique en oxygène a été analysée en utilisant une méthode respirométrique (ou manométrique) à une température de 20 °C (68 °F) dans un environnement contrôlé (Hach Company, 2010).

II.3.3. Traitement des données

Les cartes ont été confectionnées avec le logiciel Arc GIS 10.8 dans l'application ArcMap (Environmental Systems Research Institute, 2019). Les coordonnées géographiques sur terrain ont été prises à l'aide d'un appareil GPS portable de la marque **GARMIN MAP64X**.

CHAPITRE III : PRESENTATION, INTERPRETATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

III.1. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

III.1.1 Paramètres mesurés aux différents sites

Les tableaux 6 et 7 montrent les valeurs obtenues pour les paramètres mesurés aux différents sites pendant toute la période d'échantillonnage. Les résultats détaillés sont montrés aux annexes 1 à 5.

Les valeurs mentionnées en couleur rouge représentent celles qui sont en dehors de l'intervalle de valeurs d'acceptabilité de la qualité des eaux selon les grilles d'évaluation présentées au premier chapitre de ce document (Bontoux, 1993 et Degrémont 1989).

Tableau 6: Valeurs moyennes des paramètres mesurés in situ en fonction de la période de prélèvement

Paramètres / Sites	pH		C.E (µS/cm)		T.D.S (mg/l)		Turbidité (NTU)		O.D (mg/l)		Température (^{o}C)		Débit (m^3/s)	
	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC
Site 1	6,69-7,72	6,34-6,68	375	224	191	118	**241**	**294**	3,15	**1,44**	**29**	**28,47**	0,002	0,373
Site 2	7,11-7,36	6,62-6,93	149	80	73,63	45,5	**595,67**	**1533,67**	3,36	**1,34**	**30,23**	**27,15**	0,21	2,12
Site 3	-	6,45-6,67	-	148	-	85,16	-	**245,45**	-	**1,39**	-	**28,75**	-	0,136
Site 4	5,91-7,06	6,65-6,88	360	194	186,36	113,66	**164,67**	**346,83**	**2,61**	**1,33**	**30,97**	**27,88**	0,041	0,36
Site 5	6,15-7,23	6,61-6,79	371	216	185,33	108,16	**274,33**	**345**	**2,78**	**1,33**	**29,6**	**27,45**	0,04	0,723

Légende : **SC** = Saison culturale, **SNC** = Saison non culturale

Tableau 7: Valeurs moyennes des paramètres analysés au laboratoire en fonction de la période de prélèvement.

Sites	PO_4^{3-} (mg/l)		NO_3^- (mg/l)		NO_2^- (mg/l)		$N\text{-}NO_2^-$ (mg/l)		DBO_5 (mg/l)		DCO (mg/l)		NH_4^+ (mg/l)		M.E.S (mg/l)		P. total (mg/l)		$N\text{-}NH_4^+$ (mg/l)		$N\text{-}NO_3^-$ (mg/l)	
	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC	SNC	SC
S_1	0,05	0,135	1,5	3,1	0,01	0,028	0,002	0,009	7,82	**38,54**	19,7	**63**	**40,91**	**273,1**	**377**	**202**	0,95	1,052	34	**244,3**	0,34	0,71
S_2	0,06	0,26	2,71	3,9	0,01	0,026	0,002	0,008	**31,5**	**53,48**	**56,3**	**87,5**	**32,74**	**324,2**	**194**	**968**	0,66	0,96	27	**266,7**	0,71	0,8
S_3	-	0,171	-	4,2	-	0,037	-	0,011	-	**62,64**	-	**98,8**	-	**362,2**	-	**134**	-	**2,95**	-	**297,9**	-	0,95
S_4	0,08	0,194	1,56	6,5	0,01	0,036	0,002	0,011	**33,4**	**76,99**	**64**	**118**	**51,49**	**362,2**	**95**	**310**	1,32	**2,215**	42	**297,9**	0,35	1,46
S_5	0,11	0,213	1,89	6	0,01	0,051	0,003	0,016	**43,9**	**84,64**	**83,7**	**142**	**58,12**	**366**	**119**	**292**	1,71	**2,6**	48	**300**	0,4	1,37

Légende : **SC** = Saison culturale, **SNC** = Saison non cultural

Comme les prélèvements étaient effectués pendant la période non culturale (la période aussi dite sèche) à Bugoma, il n'y avait plus de cultures de riz, on avait arrêté l'irrigation et par conséquent le site 3 avait connu un assèchement, d'où l'absence d'échantillon sur ce site.

Pendant toutes les périodes et sur tous les sites d'échantillonnage, les valeurs du pH, de la conductivité, des TDS, des phosphates, des nitrates et des nitrites montrent une bonne qualité de l'eau pour la vie aquatique animale et végétale selon le classement de Bontoux (1993) et Degrémont (1989) tandis que celles de MES, de la turbidité, de la température et de l'ammonium sont en dehors de cet intervalle et ainsi montrent que l'eau est de mauvaise qualité. D'autres paramètres tels que l'oxygène dissous, la DBO, la DCO et le phosphore total ont des valeurs qui sont tantôt dans les limites acceptables tantôt en dehors de ces dernières pour la vie aquatique selon le classement de Bontoux (1993) et degrémont (1989):

- L'oxygène dissous est dans les limites de valeurs indiquant la qualité moyenne seulement sur les sites 1 et 2 en période non culturale tandis que la valeur tombe en dehors de ces dernières en période culturale sur ces mêmes sites ainsi que pendant toute la période d'échantillonnage pour les autres sites.
- Les valeurs de la DBO et de la DCO sont partout en dehors des limites acceptables pendant toutes les périodes sauf sur le site 1 en période non culturale.
- Le phosphore total dépasse les limites des valeurs acceptables pour les eaux des rivières seulement sur les sites 3,4 et 5 en période culturale.

III.1.2. Variation saisonnière des paramètres

III.1.2.1. Variation spatio-temporelle des paramètres mesurés *in situ*

- **pH**

La figure 9 montre que les valeurs du pH sur les sites 1 et 2, en période non culturale sont plus élevées à celles obtenues en période culturale contrairement à ce qu'on observe pour les sites 4 et 5. Au niveau de la rivière Kivogero, sites 1, 4 et 5, selon qu'on se déplace de l'amont vers l'aval le pH baisse au site 4 et remonte au site 5.

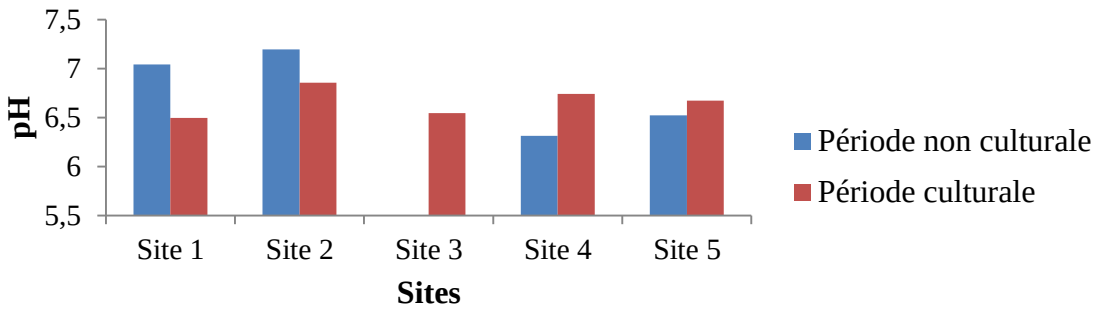


Figure 9: Variation du pH en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **Conductivité et les TDS**

En regardant les figures 10 et 11 ci-dessous, on constate que la conductivité et les TDS en période non culturale ont été plus élevées par rapport à celles mesurées en période culturale. Pendant toutes les périodes, seul le deuxième site présente des conductivités et TDS les moins élevées par rapport aux autres sites. Pour les sites qui se trouvent sur la rivière Kivogero (sites 1,4 et 5), on assiste des valeurs de la conductivité et TDS qui ne varie pas en période non culturale alors qu'elles vont en variant en période culturale, de l'amont a l'aval. Comme le pH, ces valeurs baissent au site 4 et remontent au site 5.

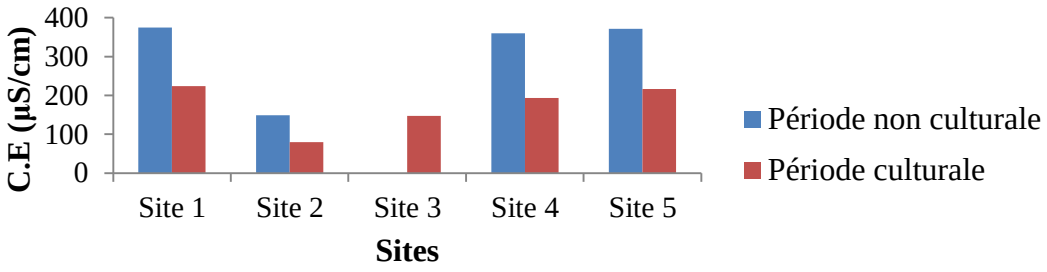


Figure 10: Variation de la conductivité électrique en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

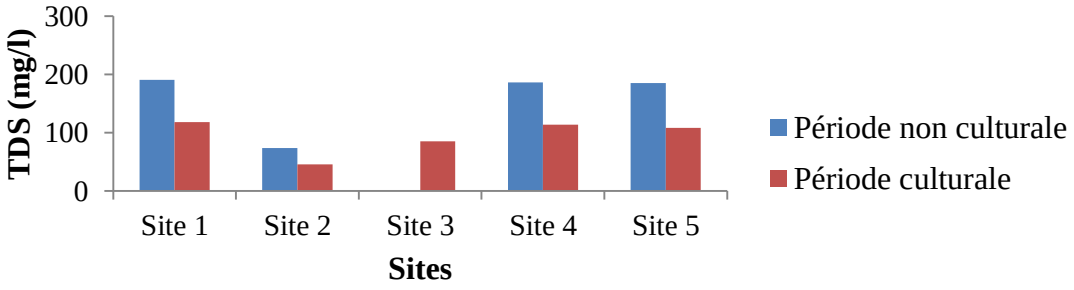


Figure 11: Variation des T.D.S en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **Oxygène dissous**

En observant la figure 17 qui représentant les concentrations en oxygène dissous pendant la période non culturale et culturale, on constate que la valeur de ce paramètre sur tous les sites est moins élevée en période culturale qu'en période non culturale. Pour les sites sur la rivière Kivogero, notamment les sites 1, 4 et 5, On constate une légère diminution progressive de l'oxygène dissous suivant qu'on se déplace de l'amont à l'aval, et cella, seulement en période culturale.

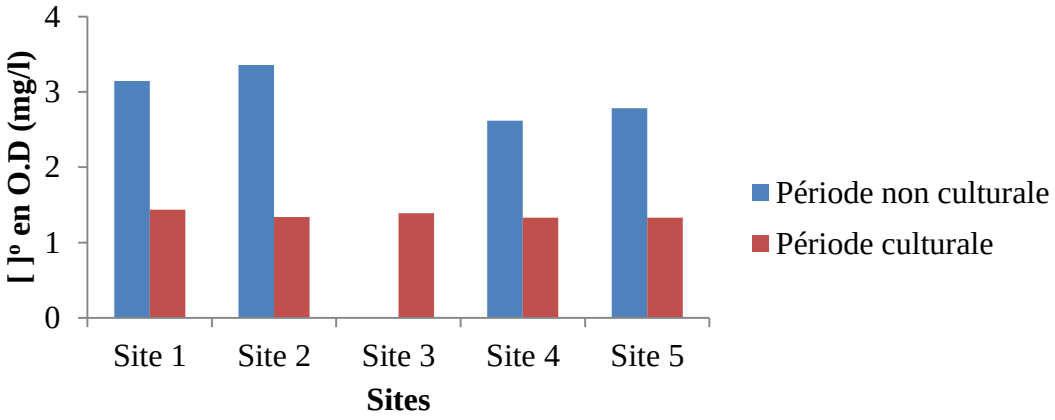


Figure 12: Variation de l'oxygène dissous en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **Turbidité**

La figure 13 représentant les variations de la turbidité montrent des valeurs plus élevées sur le site 2 par rapport aux autres sites. Contrairement aux autres paramètres mesurés in situ, la turbidité est plus élevée en période culturale qu'en période non culturale. En période non culturale, les sites 1 et 4 ont presque une même turbidité. C'est ce qu'on constate aussi pour les sites 4 et 5 en période culturale

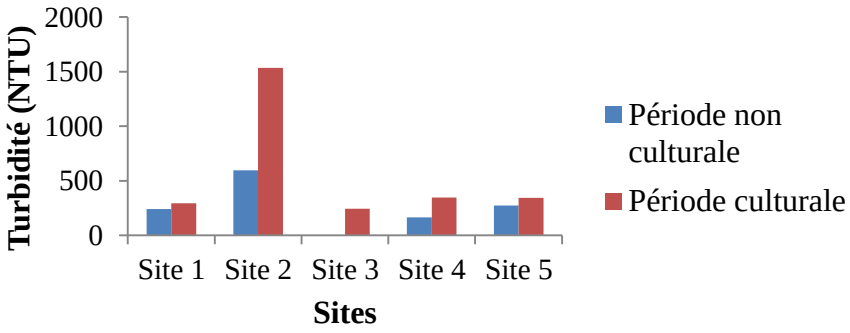


Figure 13: Variation de la turbidité en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **Température et débit**

Comme l'oxygène dissous, la température (Figure 14 ci-dessous) a chuté pendant la période culturale, ce qui est contraire au débit (Figure 15 ci-dessous) qui a augmenté pendant cette même période. Considérant les sites se trouvant sur la rivière Kivogero, on constate une diminution progressive de la température en quittant de l'amont vers l'aval alors que le débit évolue en augmentant suivant ce même sens de déplacement.

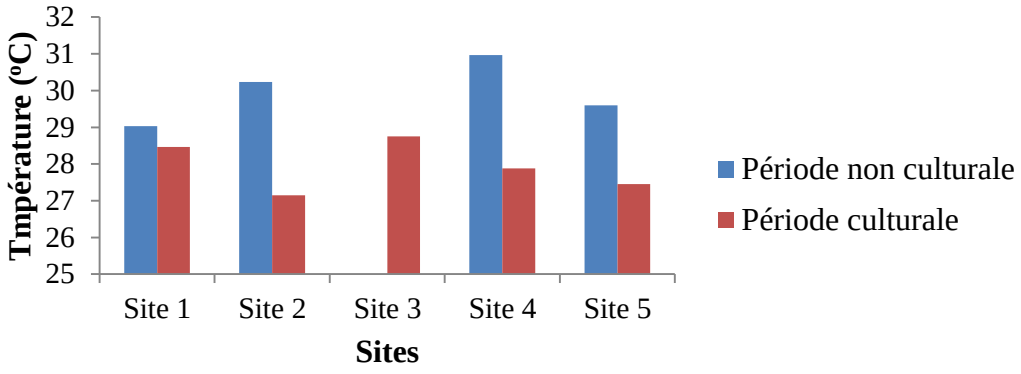


Figure 14: Variation de la température en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

Sur la figure 15 ci-haut, un plus grand débit se remarque sur le deuxième site seulement en période culturale et reste supérieur sur tous les sites à celui de la période non culturale. Sur la rivière Kivogero, le débit augmente au fur et à mesure que l'on avance vers l'aval.

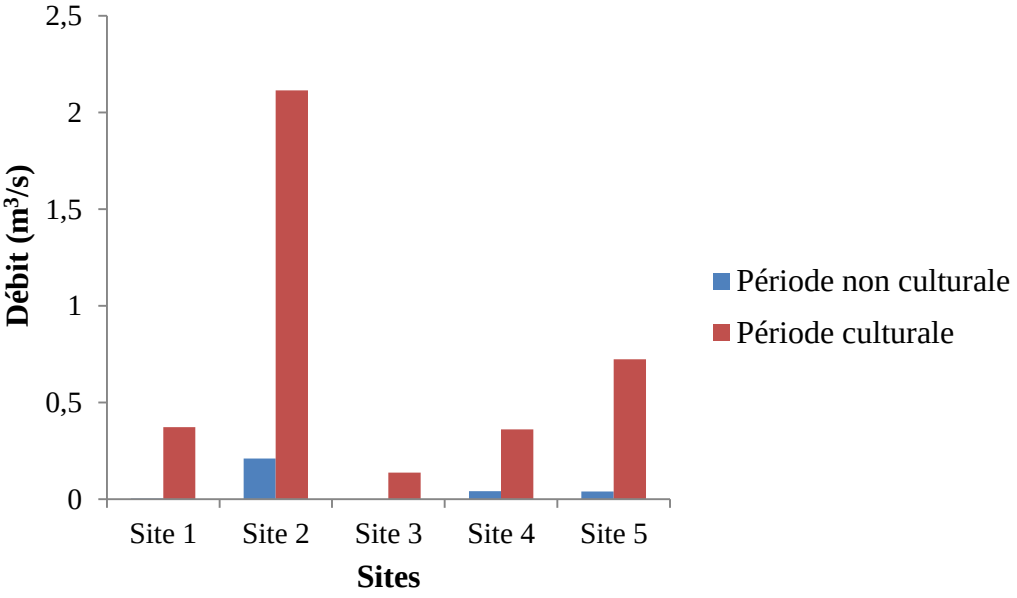


Figure 15: Variation du débit en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

III.1.2.2. Variation spatio-temporelle des paramètres analysés au laboratoire

- **Phosphates et phosphore total**

En observant les figures 16 et 17 ci-dessous, on remarque que les concentrations en période culturale sont supérieures à celles en période non culturale et que ces dernières évoluent, pendant toutes les périodes, en augmentant de l'amont à l'aval sur la rivière Kivogero.

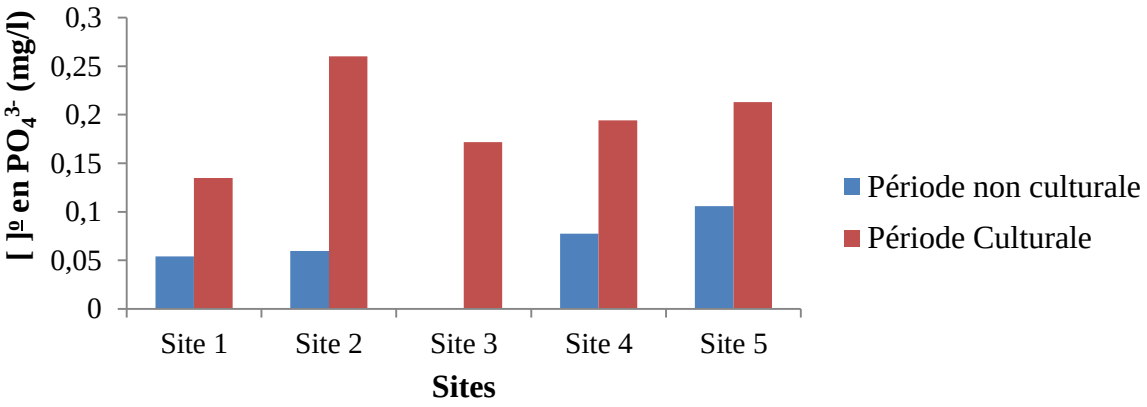


Figure 16: Variation des phosphates en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

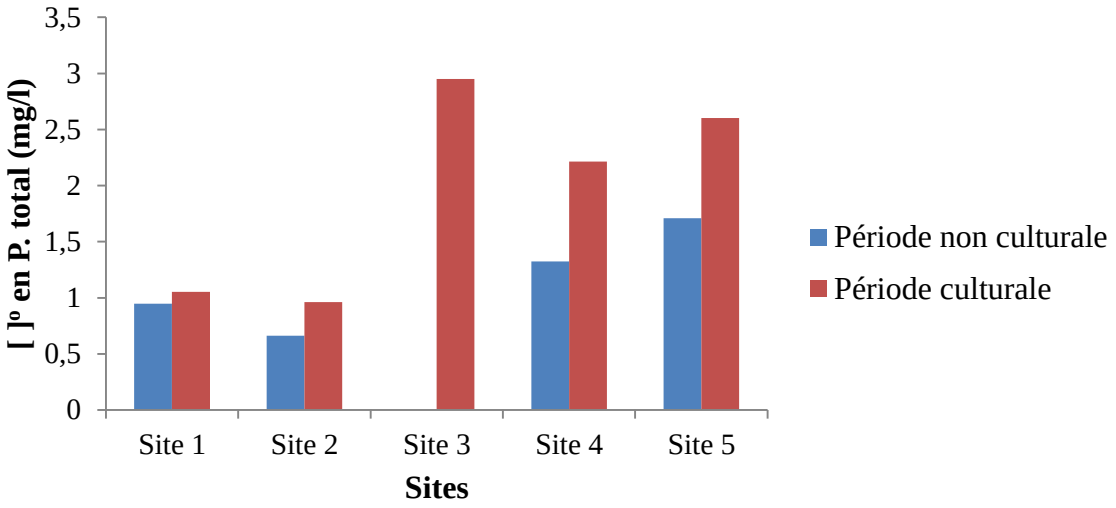


Figure 17: Variation du phosphore total en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

Composés azotés

Les figures 18, 19 et 20 qui représentent respectivement les nitrates, les ammoniums et les nitrites donnent le même constat que celui observé chez les composés phosphorés ci-haut. Seulement, pour les nitrates et les nitrites, les concentrations sont presque égales en période non culturales aux sites se situant sur la rivière Kivogero, de l'amont à l'aval.

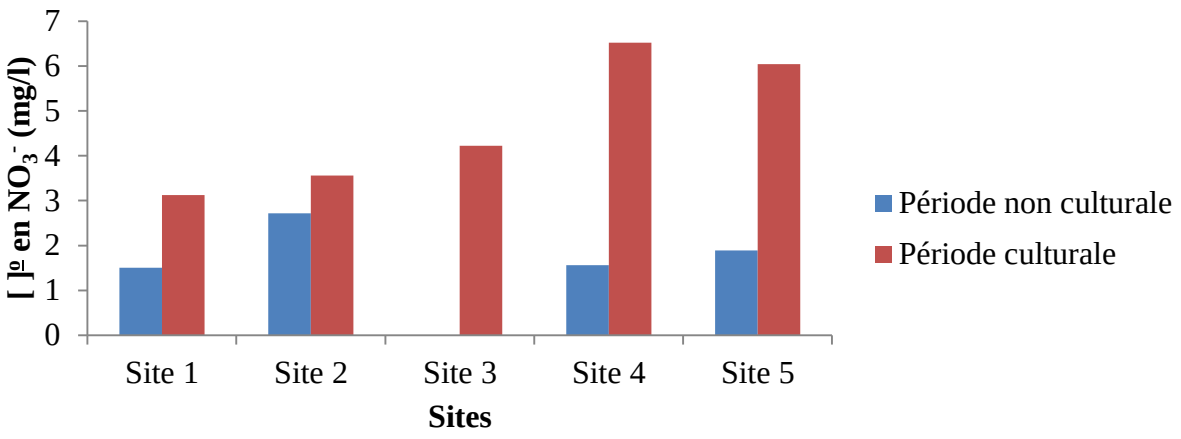


Figure 18: Variation des nitrates en fonction des sites d'échantillonnage et du période de prélèvement des échantillons

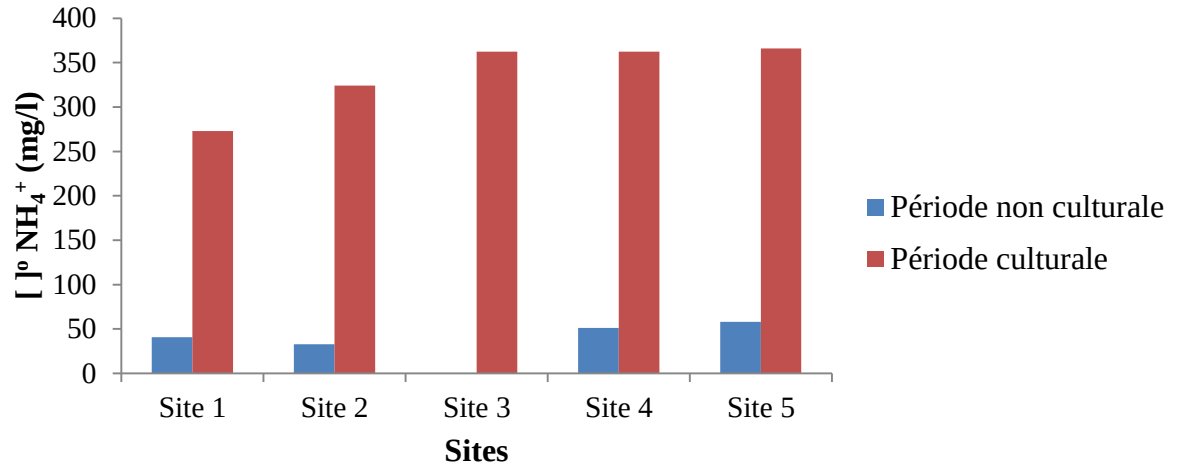


Figure 19: Variation des ions ammonium en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

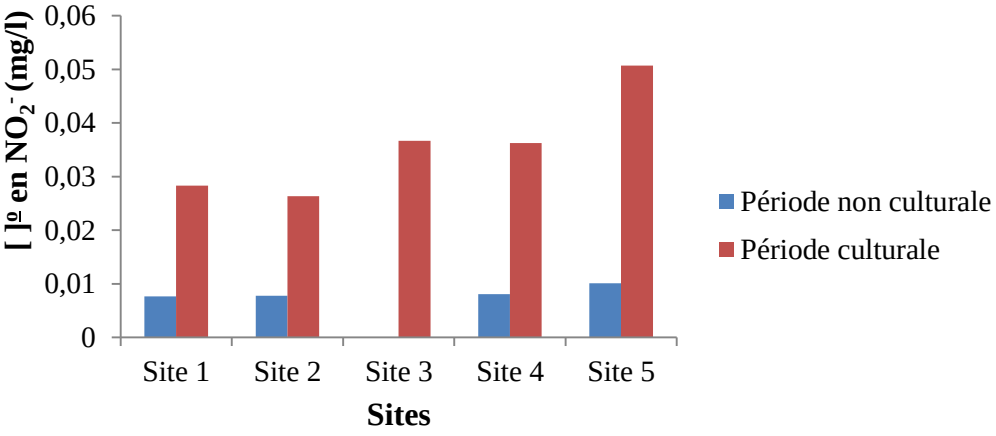


Figure 20: Variation des nitrites en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **DBO et DCO**

La DBO5 en période culturale est plus élevée que celle observée en période non culturale et augmente progressivement dans le sens de l'amont à l'aval des eaux de la rivière Kivogero. Il en est de même pour la DCO (Figure21 et 22 ci-dessous)

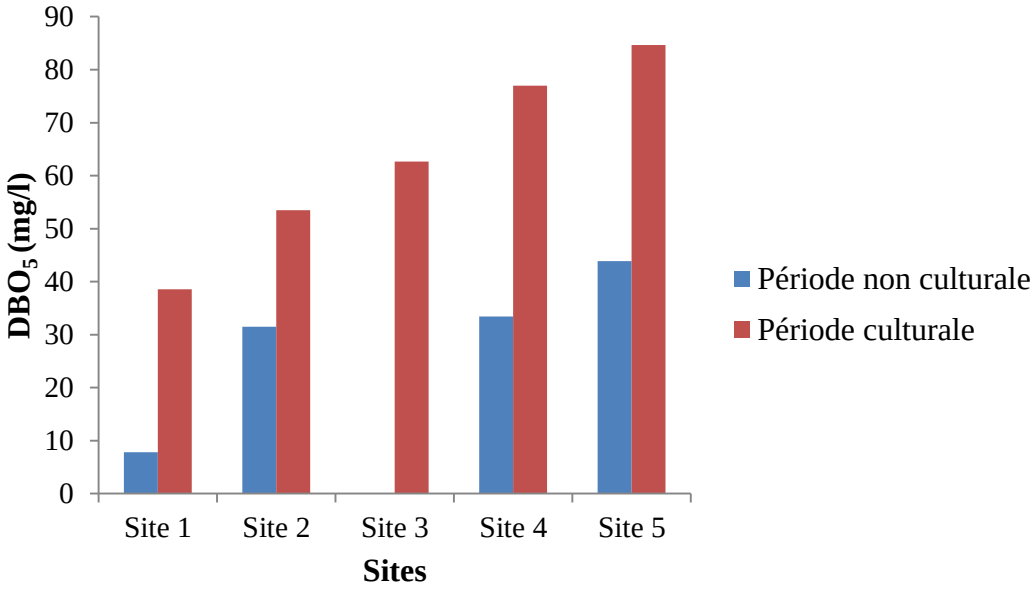


Figure 21: Variation de la DBO_5 en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

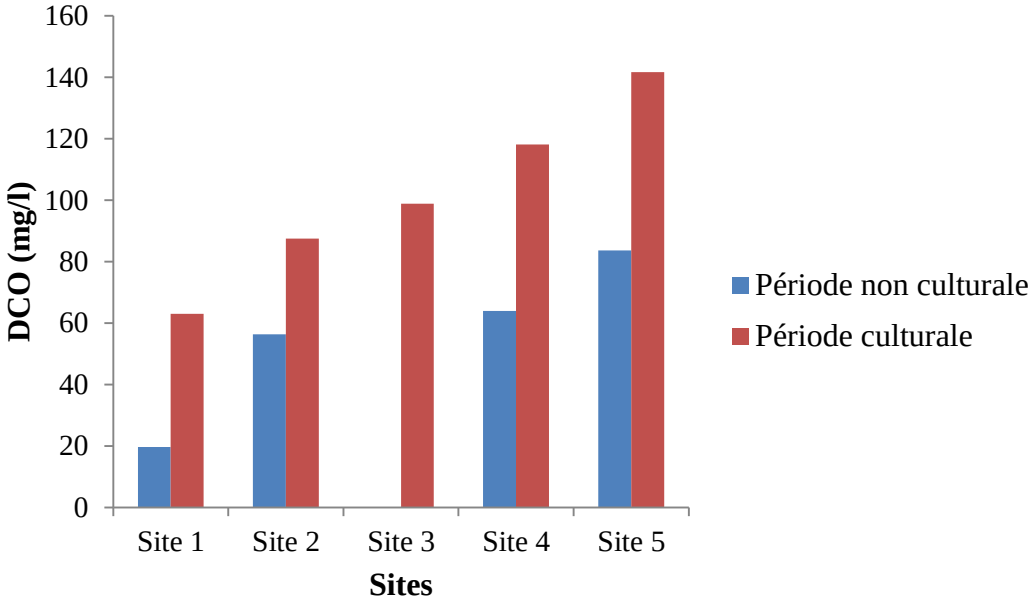


Figure 22: Variation de la DCO en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

❖ **MES**

Les eaux du site 2 sont plus chargées en MES en période culturale par rapport à celles des autres sites. A part du premier site où les charges en MES pendant la période non culturale sont inférieures à celle obtenues en période culturale, on assiste un cas contraire aux autres sites. Les sites 4 et 5 présentent presque les mêmes concentrations en MES, que ça soit en période non culturale et culturale

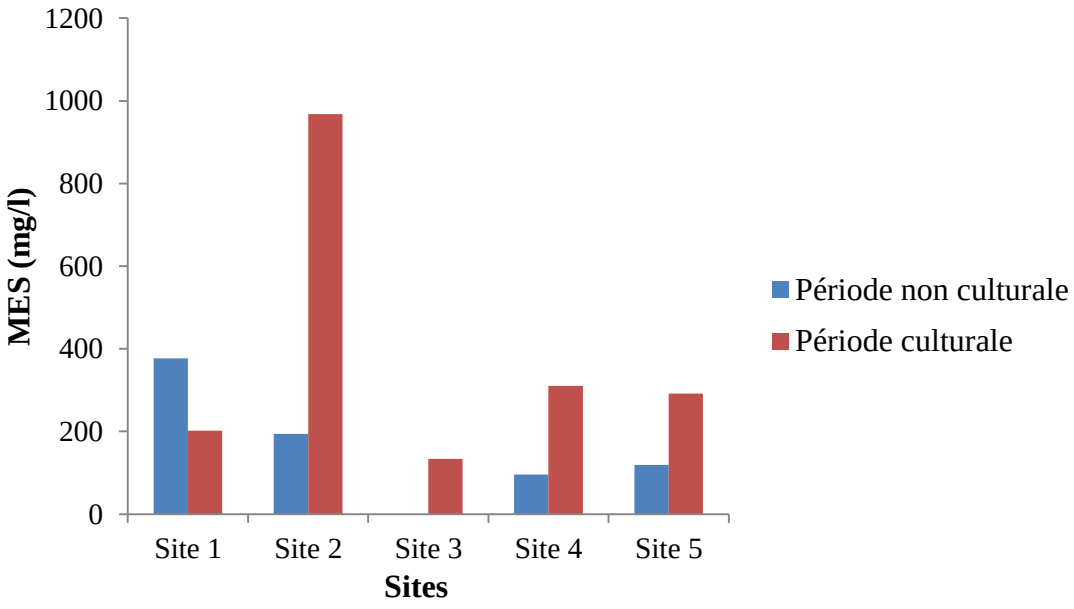


Figure 23: Variation des M.E.S en fonction des sites d'échantillonnage et de la période de prélèvement des échantillons

III.1.2 Charges polluantes envoyées dans la rivière Mutimbuzi par les eaux de Kivogero

Cette estimation a été faite sur les paramètres trouvés au niveau du site 5, site qui est en aval de tous les autres sites échantillonnés dans cette étude. En effet, les eaux de ce site se déversent directement dans la rivière Mutimbuzi.

III.1.2.1 Charges polluantes en nutriments

Tableau 8: Résultats de l'estimation des flux en nutriments en kg/j apportés par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période non culturale

Paramètres	**PO_4^{3-}**	**NO_3^-**	**NO_2^-**	**$N\text{-}NO_2^-$**	**P tot.**	**NH_4^+**	**$N\text{-}NH_4^+$**	**$N\text{-}NO_3^-$**	**Débit (m^3/j)**
Concentrations (mg/l)	0,11	1,592	0,01	0,003	1,71	58,1203	47,64	0,359	3427,2
Flux (kg/j)	0,36	6,48	0,04	0,011	5,86	233,46	163,27	1,23	

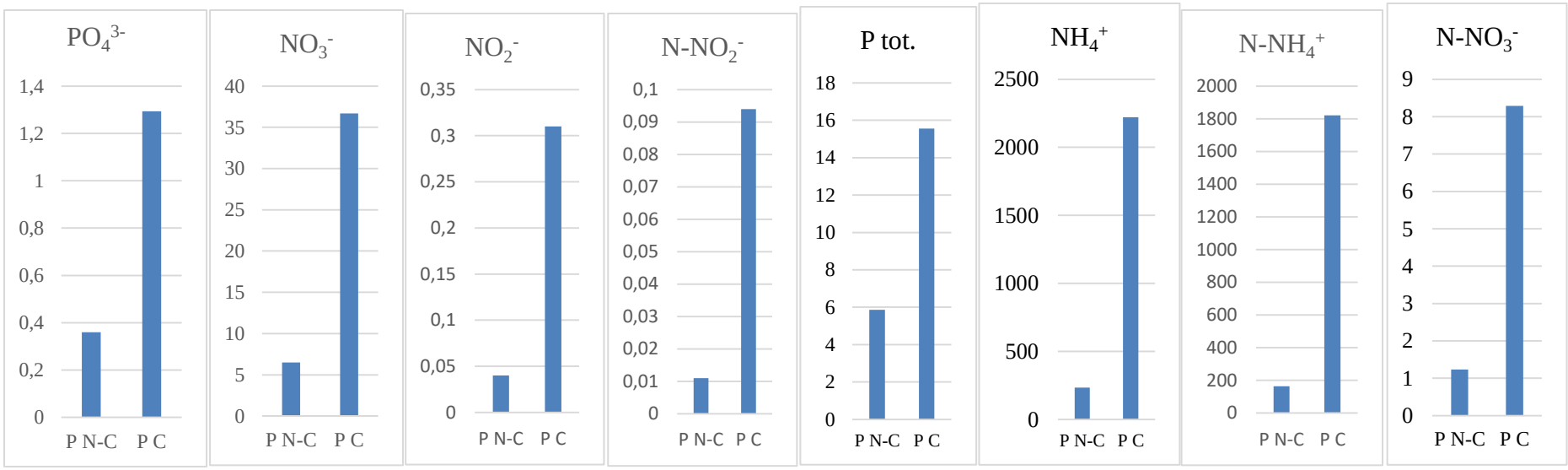
Tableau 9: Résultats de l'estimation des flux en nutriments apportés par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période culturale

Paramètres	**PO_4^{3-}**	**NO_3^-**	**NO_2^-**	**$N\text{-}NO_2^-$**	**P. tot**	**NH_4^+**	**$N\text{-}NH_4^+$**	**$N\text{-}NO_3^-$**	**Débit** (m^3/j)
Concentrations (mg/l)	0,213	6,044	0,051	0,015	2,56	365,987	300	1,365	6071,38
Flux (kg/j)	1,29320394	36,69583	0,31	0,094	15,5529	2222,04	1820,518	8,288	

Tableau 10: Résultats d'estimation des flux en azote total (NT)

Paramètres		**$N\text{-}NO_2^-$**	**$N\text{-}NH_4^+$**	**$N\text{-}NO_3^-$**	**N_{inorg}**	**N_{org}**	**NT**
Flux (kg/j)	**SNC**	0,011	163,27	1,23	164,513	98,71	**263,22**
	SC	0,094	1820,52	8,29	1829	1097,34	**2926,34**

Légende : **SC** = Saison culturale, **SNC** = Saison non culturale



Légende : **PC** = Période culturale, **PNC** = Période non culturale

Figure 24: Comparaison des charges polluantes des nutriments en période non culturale (PN-C) et en période culturale (PC)

Ces résultats présentés dans les tableaux 8, 9 et 10 ainsi que dans la figure nous donnent des estimations de flux de différents nutriments apportés par la rivière Kivogero dans la rivière Mutimbuzi pendant toutes les périodes.

On remarque que la saison culturale a été marquée par des valeurs des flux en charges polluantes plus élevées pour tous les nutriments qu'en saison non culturale.

III.1.2.2 Charges polluantes en MES, DBO_5 et DCO

Tableau 11: Résultats de l'estimation des flux en MES, DBO_5 et DCO apportées par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période non culturale

Paramètres	MES	DCO	DBO_5	Débit (m^3/j)
Concentrations (mg/l)	118,67	83,67	43,88	3427,2
Flux (kg/j)	406,69	286,74	150,39	

Tableau 12: Résultats de l'estimation des flux en MES, DCO et DBO_5 en kg/j apportées par les eaux de la rivière Kivogero à la rivière Mutimbuzi en période culturale

Dates	MES	DCO	DBO_5	Débit (m^3/j)
Concentrations (mg/l)	291,5	141,67	84,64	6071,38
Flux (kg/j)	1769,81	860,11	513,89	

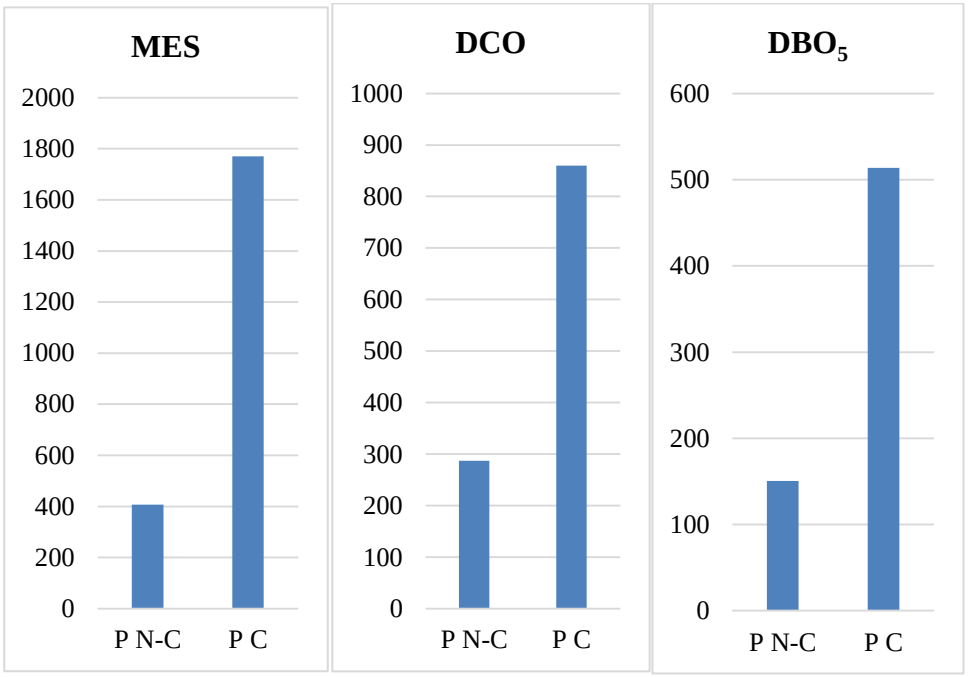


Figure 25: Comparaison de la charge polluante de MES, DCO et DBO_5 en période non culturale (PN-C) et en période culturale (PC)

En analysant les tableaux 11 et 12 ci-dessus, on remarque que les résultats des estimations de la charges polluante en MES, DBO et DCO pour la saison culturale donnent tous des valeurs plus élevées que celles obtenues en période non culturale.

III.2. DISCUSSION

Pendant toutes les périodes et sur tous les sites d'échantillonnage, les paramètres le pH, la conductivité, les TDS, les phosphates, les nitrates et les nitrites ont montré une bonne qualité des eaux étudiées pour les organismes aquatiques selon le classement de Bontoux (1993) et Degrémont (1989) tandis que les MES, la turbidité, la température et l'ammonium sont en dehors des normes de qualité. D'autres paramètres tels que l'oxygène dissous, la DBO, la DCO et le phosphore total ont des valeurs qui sont dans les limites acceptables seulement sur le premier site en période non culturale mais en dehors de ces dernières à toutes les périodes et à tous les sites.

Parmi les paramètres mesurés *in situ*, les valeurs du pH, de la conductivité, des TDS et de l'oxygène dissous ont été plus élevées en période non culturale qu'en période culturale, contrairement aux autres paramètres comme la turbidité, la température et le débit. Cela pourrait être expliqué par le fait que la période non culturale correspond à une diminution du volume d'eau de la rivière Kivogero en cette période sèche, ce qui augmente alors la concentration en sels dissous et ainsi la montée de la conductivité électrique. Par contre, en période culturale qui correspond à la période pluvieuse, les eaux de pluie et des ruissellements viennent diluer et ainsi augmenter les quantités d'eau de surface d'où la diminution de la valeur de la conductivité en cette période (Kambire, 2014). En outre, L'apport d'engrais et des pesticides des champs rizicoles de Bugoma, l'extraction du sable ou du gravier et l'érosion qui augmente les M.E.S et la turbidité de l'eau en période culturale ainsi que les déchets issus des usines d'extraction de l'huile de palme le long de Kivogero pourraient être à l'origine de la diminution de la concentration en oxygène dissous.

Les résultats obtenus des paramètres mesurés *in situ* pendant toutes les périodes d'échantillonnage sont similaires à ceux obtenu par (Miburo, 2009) sur la rivière Kamenge. Par ailleurs, les valeurs de l'oxygène dissous sont similaires à celles trouvées par Buhungu *et al.* (2018) sur la rivière Kinyankonge, une rivière qui est polluée par des rejets de plusieurs natures, surtout les eaux usées domestiques des habitants de Buterere, celles aussi passant par un by-pass de la station d'épuration (STEP) des eaux usées de Bujumbura ainsi que celles rejetées par l'usine SAVONOR.

Les nutriments, la DBO, la DCO et les MES ont tous des valeurs de concentration plus élevées en période culturale qu'en celle non culturale et suivent une évolution croissante de l'amont à l'aval sur la rivière Kivogero (Sites 1,4 et 5). Ce constat a été aussi observé par Ntakiyiruta *et al.*, (2017) sur la rivière Ntahangwa et par Langenberg *et al.*, (2003a) sur la même rivière. Cela pourrait être expliqué, selon Bliefert & Perraud (2001), par une accumulation croissante que

subissent ces eaux de la matière organique de l'amont a l'aval). Par ailleurs, l'apport des fertilisants et des pesticides aux champs rizicoles qui occupent cette partie, les déchets, la décomposition d'organismes végétaux (feuilles des plantes de la récolte précédente par exemple) ainsi que l'érosion pourraient être à l' origine de ce phénomène.

Les valeurs les plus élevées du phosphore total sont observées sur le site 3, le site 4 et le site 5. Cela serait dû au fait que le site 3 se trouve entre les champs cultivés et reçoit directement des nutriments lors de l'épandage d'engrais, le site 4 se trouve en aval d'une raffinerie de l'huile de palme dont les ruissèlements pourraient rassembler ses déchets vers ce site et enfin le site 5, qui est le plus en aval de tous les autres sites, reçoit les charges combinées du site 3 et 4.

Parmi les composés azotés (NO_2^-, NO_3^- et NH_4^+), les résultats nous montrent une très forte concentration en ion ammonium (NH_4^+) par rapport aux nitrates et nitrites qui, au contraire sont en faible concentration. Les nitrates et les nitrites étant les formes oxydées de l'azote et leurs valeurs restent dans l'intervalle des limites acceptables, montrent une bonne qualité des eaux sur tous les sites échantillonnés**.** Ainsi, l'ammonium étant la forme réduite de l'azote et reste en dehors des intervalles décrits par cet auteur pendant toutes les périodes et sur tous les sites, il montre une très mauvaise qualité (Hors classe). Les très faibles valeurs en oxygène dissous qu'on a obtenues nous font constater que les eaux ayant fait objet de notre étude sont pauvres en oxygène surtout en période culturale. Cette faible concentration en oxygène dissous provoque alors la faible ou non réaction d'oxydation des ions ammoniums (Nitritation et puis nitratation), d'où leur concentration est plus élevée par rapport à celles des nitrites et nitrates.

En période non culturale et culturale, nous constatons que la DBO et la DCO varient de la même façon depuis l'amont vers l'aval sur la rivière Kivogero en suivant une évolution croissante. Ensuite, sur tous les sites, lorsque l'un de ces paramètres augmente, l'autre augmente aussi, ce qui fait penser à une liaison entre ces deux paramètres. Cette corrélation a été également observée lors des études faites par Yapo *et al.*, (2009) sur la matière organique contenue dans les eaux usées et par Buhungu *et al.*, (2018) sur les eaux de la rivières Kinyankonge. La valeur α du rapport DBO_5/DCO exprimant le degré de dégradation biochimique a été de 0,48 en moyenne pour la période non culturale et de 0,59 en période culturale. Tenant compte que cette valeur n'est pas proche de 0, on peut admettre que la quantité des composés non biodégradables biochimiquement n'est pas élevée.

Les estimations des flux faites à la sortie des eaux de la rivière Kivogero ont concerné les nutriments (composés azotés et phosphorés), la DBO, la DCO et les matières en suspension. On a constaté que les charges polluantes en période culturale sont plus élevées que celles estimées

en période non culturale. Cela à cause des concentrations et du débit qui étaient plus élevés en période culturale qu'en période non culturale. Toutes ces quantités proviendraient des engrais et des pesticides apportées aux champs rizicoles de Kirekura (Bugoma 1) et ceux de Maramvya ainsi que des déchets divers y compris ceux des raffinages de l'huile de palme ramassés par des eaux de ruissellement que reçoivent ces eaux de Kivogero.

Considérant toutes les valeurs de flux en nutriments, on constate que les composés azotés affichent des valeurs plus grandes que les composés phosphorés. Ce constat a été aussi observé par Brion *et al*., (1999) sur les eaux de la rivière Mutimbuzi où ces chercheurs ont remarqué que ces eaux sont plus riches en azote. Si alors ces quantités traversent la rivière Mutimbuzi et arrivent au lac Tanganyika sans une autoépuration, elles pourraient être source d'eutrophisation, ce qui constitue encore une menace pour la qualité de l'eau et la biodiversité de ce lac.

Quant aux estimations en MES, on a eu le même constat. Les quantités obtenues sont élevées surtout en période culturale. En se sédimentant, ces MES pourraient contribuer à la diminution de la profondeur de la rivière Mutimbuzi (le milieu récepteur de tous ces eaux) ce qui donnerait comme résultat le débordement des eaux occasionnant alors les inondations et autres dégâts qui peuvent survenir en période des crues.

CONCLUSION GENERALE ET SUGGESTIONS

L'objectif de cette étude était de contribuer à la gestion durable des ressources en eaux de surface. On a évalué la qualité des eaux de la rivière Kivogero tout en tenant compte du fait que ces dernières traversent plusieurs champs agricoles, surtout certains milieux rizicoles de Kirekura (Bugoma 1) et de Maramvya. Pour cela, l'échantillonnage a été effectué pendant deux périodes distinctes: la période non culturale et celle culturale. Les résultats trouvés montrent que la qualité de ces eaux est bonne en considérant certains paramètres et mauvaise en considérant d'autres paramètres. Les paramètres tels que le pH, la conductivité, les TDS, les nitrates, les nitrites et les phosphates ont répondu aux critères d'acceptabilité alors que les ammoniums, la turbidité, la DBO, la DCO, les M.E.S, la température, le phosphore total et l'oxygène dissous n'ont pas répondu. En outre, de ces résultats, on a pu constater que les eaux de la rivière Kivogero ont des concentrations en matière organique plus élevées pendant la période culturale que celles en période culturale, ce qui serait dû aux pratiques agricoles de cette partie sur la qualité des eaux de cette rivière.

De ce fait, les eaux de la rivière Kivogero étant en connectivité directe avec celles de la rivière Mutimbuzi, tout juste en son point se trouvant à une distance de quelques 7,51 km à partir du Lac Tanganyika, cette charge affecte la rivière Mutimbuzi et plus en aval le lac et ainsi contribue à l'eutrophisation des eaux de ce dernier. En outre, les résultats de notre étude montrent que les eaux de la rivière Kivogero déversent d'importantes quantités de matières polluantes dans la rivière Mutimbuzi et beaucoup plus en période culturale qu'en période non culturale.

Cette étude nous montre que les eaux de Kivogero peuvent être qualifiées de mauvaise qualité et reçoivent des eaux polluées presque au même titre que les eaux des rivières traversant la ville de Bujumbura.

Au terme de ce travail, nous émettons les suggestions suivantes :

Aux chercheurs:

- Faire d'autres études similaire à celle-ci, surtout celles liées à la santé environnementale et celles liées la vie ou à la biologie aquatique.
- Faires des études similaires sur les autres milieux rizicoles afin d'avoir une idée globale sur les menaces causées par la riziculture sur les eaux de surface.

Au Ministère de l'Environnement :

- Réhabiliter l'embouchure de la rivière Kivogero en la protégeant contre l'érosion ;

- Créer une zone tampon à partir des bords de la rivière Kivogero ainsi que les autres rivières ;
- Sensibiliser les populations et surtout les riziculteurs à l'utilisation des engrais et produits non polluants ainsi que sur l'importance de la conservation et la protection de l'environnement

A l'université du Burundi:

- Augmenter le temps consacré à la recherche pour les études de Master afin de pouvoir aussi aborder des sujets réalisables dans de longues périodes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Adjagodo, A., Agassounon Djikpo Tchibozo, M., Kelome, N. C., & Lawani, R. (2016). *Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaine trophique à travers le monde*: *Synthèse bibliographique* International Journal of Biological and Chemical Sciences, *vol. 28(10)* 7-23. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i3.43
2. Ado, G., Desayes, H., & Mama, D. (2000). *Etude statistiques du role du phosphore et de l'azote total NKT dans le mecanisme d'eutrophisation des lacs de la ville de Yamoussoukro en Cote d'Ivoire*. Laboratoire des procedes industriels de synthese et de l'environnement(LAPISEN), Departement de agenie Chimique et Agro-Alimentaire de l'INP-HB.
3. Amara, R. (2010). Impact de l'anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins. Exemple de la Manche-mer du nord. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 8,* vol. 101(29): 143-196. https://doi.org/10.4000/vertigo.10129
4. Arfib, B. (2001). *Hydrométrie pratique des cours d'eau : Mesure du débit (Guide pratique de terrain)*. Aix-Marseille Université.
5. Arnold, E., Greenberg, APHA, Lenore, S., Clesceri, WEF, Andrew, D., & Eaton. (1992). *Standards Methods : For the Examination of Water and Wastewater* (18th Edition). American Public Health Association(APHA), American Water Works Association, Water Environment Federation.
6. Aw, S., N'goran, B., Siaka, S., & Parinet, B. (2011). Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : Cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *J. Appl. Biosc.*, 38: 2573-2585.
7. Bliefert, C., & Perraud, R. (2001). *Chimie de l'environnement : Air, eau, sols, déchets*. De Boeck Université.
8. Blum, A., Rouzeau, O., Guiraud, A., & Bourdaa, S. (2014). *Suivi de la turbidite des eaux de Guyane.Etat des lieux et recommandations. Approche par télédétection* (Rapport final BRGM/RP-61632-FR; Docu,ent public).
9. Bonneuil, C., & Fressoz, J.-B. (2013). *L'événement Anthropocène*. https://www.videos-streaming.eu/replay/L-homme-a-mange-la-Terre.htm

10. Bontoux, J. (1993). *Introduction à l'étude des eaux douces : Eaux naturelles, eaux usées, eaux de boisson : qualité & santé / Jean Bontoux* (2e éd. rev. et compl.). CEBEDOC Lavoisier.

11. Brion, N., Nzeyimana, E., Goeyens, L., Nahimana, D., & Baeyens, W. (1999). *Nitrogen dynamics in northern lake Tanganyika* (Technical Report 7; Pollution Control and Other Measures to Protect Biodiversity in Lake Tanganyika (RAF/92/G32), p. 12). Institut National pour Environnement et Conservation de la Nature.

12. Bronk, D. A. (2002). Dynamics of DON. In *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter* (Dennis A. Hansell and Craig A. Carlson, p. 807: 153-247). ACADEMIC PRESS, Elsevier Science. http://www.academicpress.com

13. Brun, B. (1997). L'impact de l'homme sur la nature : Évolution du vocabulaire. In *Impact de l'Homme sur les milieux naturels : Perceptions et mesures* (Editions de Bergier, p. 208). Société d'Écologie Humaine.

14. Bruxelles Environnement. (2006). *Fiche méthodologique—Indicateur : Qualité physico-chimique générale des eaux de surface* (Aquatique, p. 7) [« Analyse pluriannuelle de la qualité chimique et physico-chimique des eaux de surface en Région de Bruxelles-Capitale - Exploitation des rapports annuels d'analyse des réseaux de surveillance »]. Bruxelles Environnement - département état de l'environnement et indicateurs. http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/Eau_base_Synthese_20012004.PDF

15. 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. *Int. J. Biol. Chem. Sci*, *vol.12(1)*: 576-595.

16. Canada, E. (2006). *Notions élémentaires sur l'eau douce : Questions et réponses* (J. Bianchi, Éd.). Environnement Canada. https://doi.org/En37-90/2006F-PDF

17. Degrémont. (1989). *Mémento technique de l'eau. Tome 1* (9e éd). Degrémont. http://biblio-fssm.uca.ma/index.php?lvl=notice_display&id=665

18. Dejiho, C. A., Mama, D., Dimon, B. F., Chouti, W., Alassane, A., Fiogbe, E. D., & Sohounhloue, C. K. D. (2013). Influence de l'état d'eutrophisation de la lagune de Gbèzoumè (Ouidah) sur sa faune aquatique. *Int. J. Biol. Chem. Sci. 7(5): 2069-2077*, 9.

19. de Marsily, G. (2013). 6. Le cycle de l'eau. In A. Euzen, L. Eymard, & F. Gaill (Éds.), *Le développement durable à découvert* (p. 64-65). CNRS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.10608

20. Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, EP, CONSIL, 327 OJ L (2000). http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/fra

21. Ducharne, A., & Laval, K. (2015). 4. Le cycle de l'eau. In A. Euzen, C. Jeandel, & R. Mosseri (Éds.), *L'eau à découvert* (p. 26-27). CNRS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.9764

22. Eblin, S. G., Sombo, A. P., Soro, G. M., Aka, N., Kambire, O., & Soro, N. (2014). Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, *75*, 6259-6271. https://doi.org/10.4314/jab.v75i1.10

23. El Ouali Lalami A., Merzouki M., El Hillalio.4, Maniar S., I. K. S. (2010). Pollution des eaux de surface de la ville de Fès au Maroc : typologie, origine et consequences. *Larhyss Journal*, 55-72.

24. Environmental Systems Research Institute. (2019). *ArcGIS Desktop* (10.8) [Systeme d'Information Geographique (SIG)]. Environmental Systems Research Institute Inc.

25. Environnement Bruxelles. (2020). *Chapitre 5 : Eaux de surface* [Rapport technique professionnel]. https://environnement.brussels/thematiques/eau-0

26. Ewa, E., Iwara, A., Adeyemi, J., Eja, E., Ajake, A., & Otu. (2011). Impact of industrial activities on water quality of Omoku Creek. *Sacha J. Environ. Stud.*, *1*.

27. FAO. (2002). *Les ressources mondiales en eau et agriculture*. http://www.fao.org/documents

28. FAO. (2023). *La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture : Gestion intégrée des ressources en eau* (2; p. 27). www.fao.org

29. Festy, B., Hartemann, P., Ledrans, M., Levallois, P., Payment, P., & Tricard, D. (2003). Qualité de l'eau. In *Environnement et santé publique—Fondements et pratiques* (Edisem / Tec&Doc, Acton Vale / Paris, p. 333-368).

30. Gahiro, L. (2011). *Compétitivité des filières rizicoles burundaises : le riz de l'imbo et le riz des marais* [Sciences agronomiques et Ingénierie biologique]. Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech.

31. Genet, R., Pont, D., & Garric, J. (2010). L'évaluation du risque toxique dans les milieux aquatiques : Quels outils pour quelles perspectives ? *: 1*, 61.

32. Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P., & Dewailly, É. (2003). *ENVIRONNEMENT ET SANTE PUBLIQUE: Fondements et pratiques* (TEC&DOC). Edisem inc.

33. Gold, C. (2002). *Etude des effets de la pollution métallique (Cd/Zn) sur la structure des communautés de diatomées périphytiques des cours d'eau. Approches expérimentales in situ et en laboratoire*. Université Bordeaux I.

34. Gril, J. J., Gouy, V., & Carluer, N. (1999). Processus de transfert superficiel des produits phytosanitaires, de la parcelle au bassin versant. *La Houille Blanche, 5*, 76-80.

35. Hach Company. (2004). *DR/2400 Spectrophotometer, PROCEDURE MANUAL* (22; te/dk 3/04 1ed).

36. Hach Company. (2010). *BODTrak™ II: USER MANUAL*. p. 24-31. www.hach.com

37. Hébert, S., & Légaré, S. (2000). *Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau*. Ministère de l'Environnement Gouvernement du Québec.

38. ISTEEBU. (2017). *Annuaire des statistiques de l'environnement* (p. 125). Institut de Statistiques et d'Etude Economiques du Burundi.

39. Kambire, O. (2014). *Caractérisation des eaux d'une lagune estuarienne de la Côte d'Ivoire : La Lagune Aby*. *20*, 95-110.

40. Keddari, D. (2015). *Mise au point des techniques de mesure de la DBO5, des formes azotées et des paramètres physiques des eaux superficielles, Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master* [Gestion durable des Ecosystèmes et protection de l'environnement, Option : Pollution des écosystèmes et Ecotoxicologie]. Université des Frères Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département : Biologie et Ecologie Végétale.

41. Korderas, J., & Livingstone, A. (2021). *Un guide de surveillance de la qualité de l'eau*. DataStream Initiative. datastream.org

42. Langenberg, V. T., Roijeckers, R., Nyamushahu, S., & Koelmans, A. A. (2003a). External nutrients sources for Lake Tanganyika. *J. Great Lakes Res*, 169-180.

43. Le Barbé, L., Alé, G., Millet, B., Texier, H., Borel, Y., & Gualde, R. (1993). Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. *ORSTOM (Monographies Hydrologiques ; 11)*, 540.

44. Livingstone, D. M. (1991). The diel oxygen cycle in three subalpine Swiss streams. *Archiv Für Hydrobiologie*, 457-479. https://doi.org/10.1127/archiv-hydrobiol/120/1991/457

45. Loi n°1/02 du 26 mars 2012 portant code de l'eau au Burundi, Centre de recherche en droit international de l'environnement (IELRC), Code de l'eau. info@ielrc.org – www.ielrc.org

46. Maes, E. (2007). *Les sédiments et les matières en suspension dans l'eau* (EEW - Rapport 2006-2007 - EAU 5, 5; Enlèvement des sédiments – Guide méthodologique. Evaluation

détaillée des risques liés à la gestion des sédiments et aux opérations de curage., p. 148). Agence de l'Eau Artois-Picardie, Direction Régionale de l'Environnement du nord Pas de Calais et Conseil Régional de l'Environnement du nord Pas de Calais.

47. Manseau, F. (2020). *La turbidité de la rivière Tasiapik (Umiujaq, Nunavik) en lien avec la dégradation du pergélisol* [Mémoire de Maîtrise en Sciences Géographiques]. Université de Laval.
48. Mason, C. F. (1991). *Biology of Freshwater Pollution* (2nd éd., Vol. 2). Longman Scientific and Technical. https://www.abebooks.com/9780582061910/Biology-Freshwater-Pollution-Mason-0582061911/plp
49. Massa, F. (2000). *Sédiments, physico-chimie du compartiment interstisiel et développement embryo-larvaire de la truite commune (Salmo trutta) : Etude en milieu naturel anthropisé et en conditions contrôlées* (p. 177 p.) [Phdthesis, Institut National Agronomique Paris Grignon]. https://hal.inrae.fr/tel-02841545
50. Mateo-Sagasta, J. (2020). Tackling agricultural water pollution – a 21st-century challenge. *The International Journal for Rural Developpment*, 27.
51. Meybeck, M. (1986). *Composition chimique des ruisseaux non pollués français*. Sciences Géologiques. https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6139/eau-de-surface
52. MIBURO, J. P. (2009). *Contribution à l'Etude de l'Impact des eaux de la rivière KAMENGE sur celles de la rivière NTAHANGWA* [Mémoire présente en vue de l'obtention du grade de Licencié en Pédagogie Appliquée, Agrégé de l'Enseignement Secondaire en chimie, Universite du Burundi]. Bibliothèque Centrale.
53. Morin, G., & Couillard, D. (1990). Predicting River Temperatures with a Hydrological Model. In *Cheremisinoff, N.P., Ed., Encyclopedia of Fluid Mechanic, Surface and Groundwater Flow Phenomena* (Vol. 10, p. 171-209). Gulf Publishing Company.
54. Mpawenayo, B. (1996). *Les eaux de la plaine de la Rusizi (Burundi) : Les milieux, la flore et la végétation algales* (Mémoire in-8°, Nouvelle Série, Tome 23, fasc. 2, Bruxelles, 1996; Mémoire présenté au concours annuel 1988 et couronné par la Classe des Sciences naturelles et médicales 8; p. 241). Académie Royale des Sciences d'Outre-mer.
55. Nguyen, P. D., Toumbou, B., Duchesne, S., Kokutse, N., & Villeneuve, J.-P. (2018). Assessment of the impact of diffuse pollution on river water quality with limited data : Application to the Cau River watershed. *Revue des sciences de l'eau Journal of Water Science*, *31*(3), 293-312. https://doi.org/10.7202/1054308ar

56. Ntakiyiruta, P., Nahimana, D., & Ntakimazi, G. (2017). Contribution à l'estimation quantitative des nutriments apportés par la rivière Ntahangwa au lac Tanganyika. *Afrique Science 13*(1), 360-370.

57. Nusura, H., Rémy, S., Habonimana, B., & Bigirimana, J. (2013). *Impacts des pratiques rizicoles en vigueur au Burundi sur l'environnement*. 25-36.

58. OBPE. (2021). *Rapport de l'Atelier de sensibilisation à l'intention des institutions de recherche, académique et d'implémentation sur le bulletin scientifique de l'OBPE* (p. 17). Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE).

59. OMS. (2010). *Stratégies pour la gestion sans risque de l'eau de boisson destinée à la consommation humaine* (Rapport du Secrétariat EB127/6; p. 6). Conseil Exécutif.

60. Perrodin, Y. (2013). 16. Pollution des milieux aquatiques. In A. Euzen, L. Eymard, & F. Gaill (Éds.), *Le développement durable à découvert* (p. 242-243). CNRS Éditions. https://doi.org/10.4000/books.editionscnrs.10794

61. Rachid, A. (2010). Impact de l'anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins. Exemple de la Manche-mer du nord. *Vertigo*, *101*(29). http://vertigo.revues.org/10129

62. Rassou, K. (2009). . *Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia* [Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Approfondies : Environnement Marin et Valorisation des Ressources]. Université Cadi Ayyad, Marrakech.

63. Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009). *L'analyse de l'eau* ((9e édition), Dunod-Grand format). https://halldulivre.com/livre/9782100072460-l-analyse-de-l-eau-9e-edition-jean-rodier-bernard-legube-nicole-merlet/

64. Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2016). *L'analyse de l'eau : Contrôle et interprétation* (Dunod,10e édition). https://www.dunod.com/sciences-techniques/analyse-eau-eaux-naturelles-eaux-residuaires-eau-mer-0

65. Roussel, P., Ramirez, R., Parra, D. E. L. A., Redaud, C. C. J., Benoit, G., Lin, C., Divechen, G. L. E., La, P., La, M. M., Besbes, M., La, Y. G., Michelet, P., Camus, B., Supply, W., Cities, B., Implemented, D. I., Africa, S., Board, L. W., Africa, S., … Auconie, S. (2017). L'eau douce dans le monde. *Responsabilité & Environnement*, *86*, 141.

66. Squilbin, M., & Yourassowsky, C. (2005). 2. Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : Cadre général. *Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement*, 16.

67. Triplet, P. (2015). *Dictionnaire de la diversité biologique et de la conservation de la nature* (Vol. 978, p. 722). Institut européen pour la gestion des oiseaux sauvages et de leurs habitats (OMPO).

68. Villenave, É., Budzinski, H., Etcheber, H., & Dupuy, A. (2013). Chapitre 8 : L'air et l'eau. In H. Le Treut (Éd.), *Les impacts du changement climatique en Aquitaine* (p. 235-286). Presses Universitaires de Bordeaux. https://doi.org/10.4000/books.pub.663

69. Villeneuve, V., Légaré, S., Painchaud, J., & Vincent, W. (2007). Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des sciences de l'eau*, *19*(4), 259-274. https://doi.org/10.7202/014414ar

70. Wasson, J.-G. (2001). *Les questions de recherche posées par la Directive Cadre Européenne sur l'eau : Problématique pour les eaux de surface continentales*. *1*, 1-19.

71. Yapo, B., Mambo, V., Seka, A., Yapi, A., & Houenou, P. (2009). Caractérisation par fractionnement gravimétrique de la matière organique contenue dans les eaux usées : Application à l'étude de la biodégradabilité. *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, 27(1): 21-37.

72. Zandagba, J., Adandedji, F. M., Mama, D., Chabi, A., & Afouda, A. (2016). Assessment of the Physico-Chemical Pollution of a Water Body in a Perspective of Integrated Water Resource Management : Case Study of Nokoué Lake. *Journal of Environmental Protection*, *07*(05), 656-669. https://doi.org/10.4236/jep.2016.75059

WEBOGRAPHIE

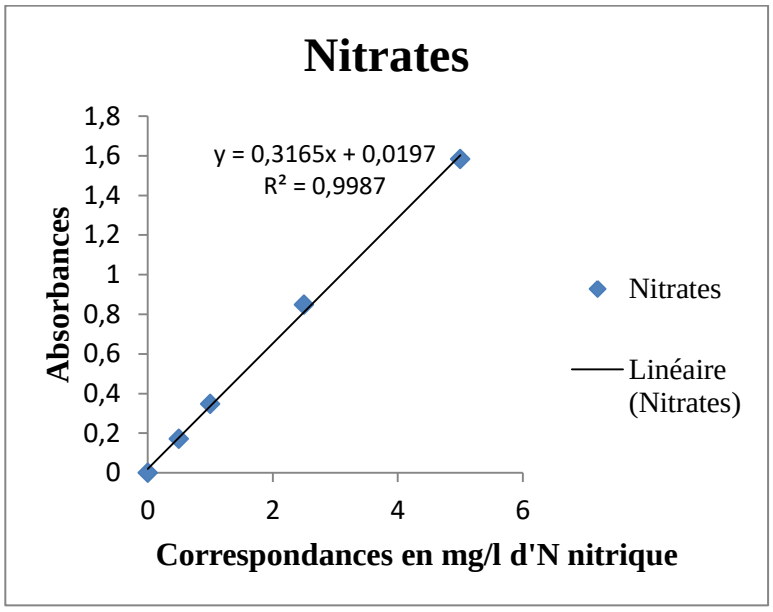
1. https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/6139/eau-de-surface, consulté le 18 novembre 2023 à 9h 37 min.
2. https://fomi.bi/?page_id=6868, visité le 21/02/2024 à 16h 16min
3. http://environnement.ecoles.free.fr/pollution_eau.htm, consulté le 14/03/2024 à 15h17min.
4. https://datastream.org/fr/guide/conductivity#conten, consulté le 13/11/2023 à 13h 24min.

ANNEXES

I. Les Courbes d'étalonnage

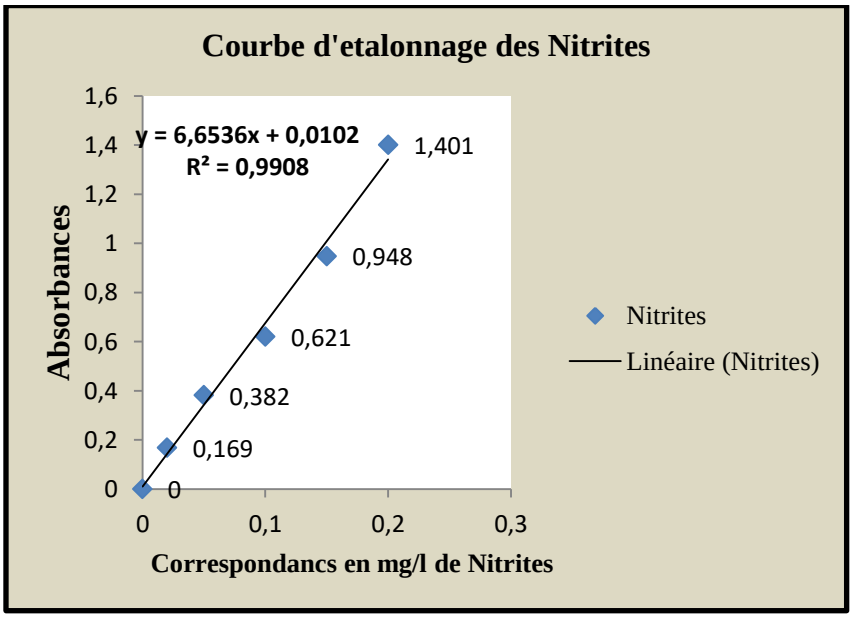
I.1. Courbe d'étalonnage des nitrates

Correspondances en mg/l d'N nitrique	Absorbances
0	0
0,5	0,171
1	0,346
2,5	0,847
5	1,583



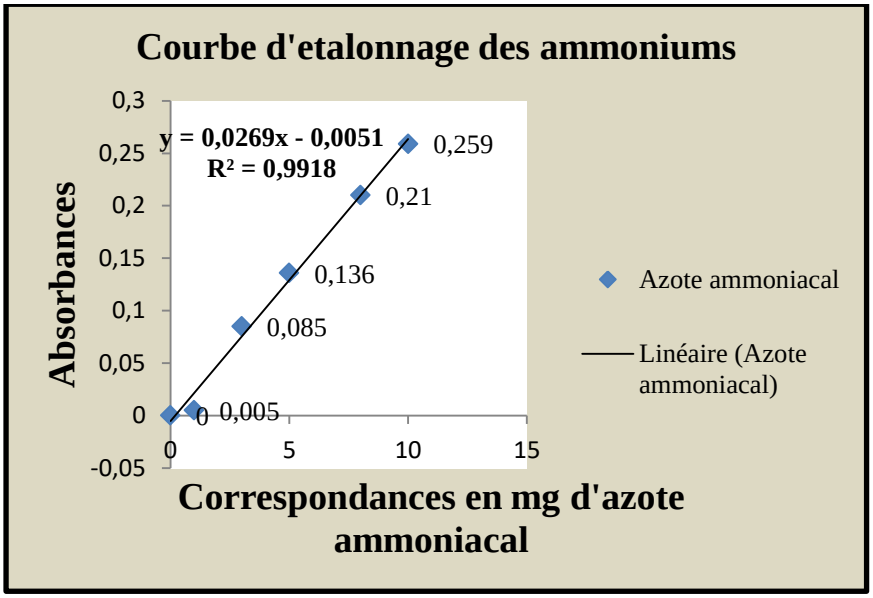
I.2. Courbe d'étalonnage des nitrites

correspondances en mg/l de nitrites	**Absorbances**
0	0
0,02	0,169
0,05	0,382
0,1	0,621
0,15	0,948
0,2	1,401



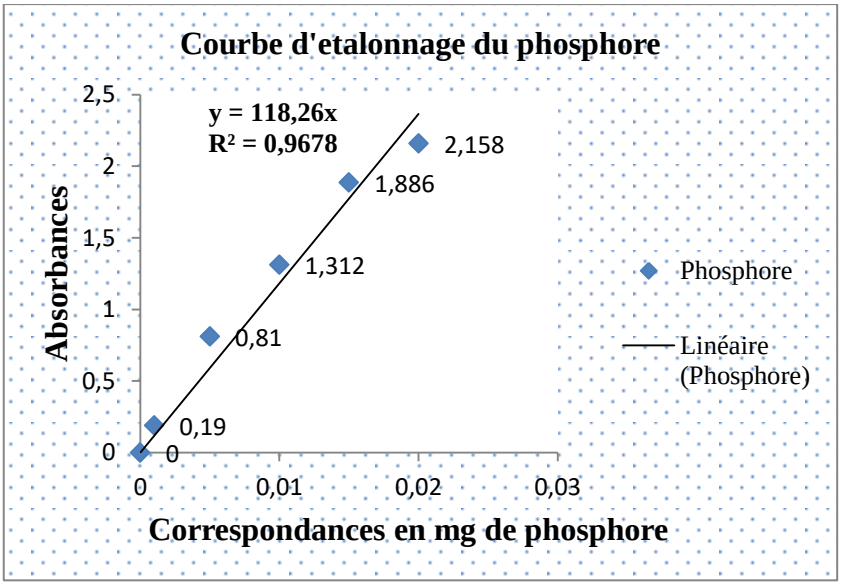
I.3. Courbe d'étalonnage de l'ammonium

correspondances en mg d'N ammoniacal	Absorbances
0	0
1	0,005
3	0,085
5	0,136
8	0,21
10	0,259



I.4. Courbe d'étalonnage du phosphore

Correspondances en mg de phosphore	Absorbances
0	0
0,001	0,19
0,005	0,81
0,01	1,312
0,015	1,886
0,02	2,158



I.2. Exemple de l'estimation du débit (au 1er échantillonnage)

Sites	Temps T (s)				Distance (m)	Vitesse (m/s)	Profondeur (m)				Largeur utile (m)			Débit (m^3/s)
	T_1	T_2	T_3	T_{moy}		V_{max}	P_1	P_2	P_3	P_{moy}	L_1	L_2	L_{moy}	Q
Site 1	59	73,5	64	65,5	10	0,153	0,02	0,018	0,025	0,021	1,2	1	1,1	0,0023
Site 2	18	17,2	16	17,066	10	0,586	0,18	0,23	0,13	0,18	5,1	4,5	4,8	0,3375
Site 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Site 4	28,31	23,64	23,76	25,236	10	0,396	0,05	0,13	0,14	0,106	2,4	3,1	2,75	0,0775
Site 5	18,35	18,76	18,95	18,686	10	0,535	0,11	0,08	0,12	0,103	1,6	2,4	2	0,0737

III. Résultats bruts des paramètres par date d'échantillonnage et par site

III.1. Résultats bruts par date d'échantillonnage et par site pendant la période non culturale

III.1.1. Résultats des paramètres mesurés *in situ* par date d'échantillonnage et par site pendant la période non culturale

Dates	Sites	pH	C.E (µS/cm)	TDS (mg/l)	OD (mg/l)	Turbidité (NTU)	T (^{o}C)	Débit (m^3/s)
	Site 1	7,72	337	180	3,62	229	31,8	0,0024
	Site 2	7,36	77	30,9	3,29	321	28,6	0,3375
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	7,06	193,5	103,1	2,92	153	30,8	0,0775
13/07/2023	Site 5	7,23	181,3	96	3,34	603	29,5	0,0737
	Site 1	6,69	391	195	3,46	251	27,1	0,0019
	Site 2	7,11	187	94	3,24	740	31,3	0,1393
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	5,91	441	220	2,96	168	31,5	0,0241
24/08/2023	Site 5	6,15	465	232	2,97	122	29,5	0,0238
	Site 1	6,72	396	197	2,36	243	28,2	0,0011
	Site 2	7,12	183	96	3,54	726	30,8	0,1516
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	5,97	446	236	1,97	173	30,6	0,0208
07/09/2023	Site 5	6,19	467	228	2,04	98	29,8	0,0215

III. 1.2. Résultats des paramètres analysés au laboratoire par date d'échantillonnage et par site pendant la période non culturale

Dates	Sites	PO_4^{3-} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	P tot (mg/l)	DCO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	M.E.S (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	N-NH_4^+ (mg/l)	N-NO_3^- (mg/l)
	Site 1	0,086	3,573	0,0012	0,91	36	10	289	40,91	33,532	0,807
	Site 2	0,088	3,559	0,0021	0,72	41	8	269	29,12	23,866	0,803
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	0,097	2,692	0,0034	0,77	42	8	83	47,26	38,736	0,608
13/07/2023	Site 5	0,108	3,615	0,0055	1,5	47	12	214	55,42	45,428	0,615
	Site 1	0,027	0,494	0,013	1,01	12	7,08	474	35,47	29,071	0,112
	Site 2	0,032	2,985	0,012	0,66	69	46,92	167	39,09	32,045	0,674
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	0,062	1,026	0,011	1,63	82	54,12	105	56,04	45,49	0,232
24/08/2023	Site 5	0,114	1,054	0,013	1,85	108	57,24	66	58,08	47,6	0,238
	Site 1	0,049	0,452	0,0088	0,92	11	6,38	367	46,35	37,993	0,102
	Site 2	0,059	1,6	0,0091	0,61	59	39,53	146	30,02	24,61	0,661
	Site 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Site 4	0,073	0,97	0,0097	1,57	68	38,08	98	50,89	41,71	0,219
07/09/2023	Site 5	0,095	1	0,0118	1,78	96	62,4	76	60,86	49,888	0,225

III.2. Résultats bruts par date d'échantillonnage et par site pendant la période culturale

III.2.1. Résultats des paramètres mesurés *in situ* par date d'échantillonnage et par site pendant la période culturale

Dates	Sites	pH	C.E (µS/cm)	TDS (mg/l)	OD (mg/l)	Turbidité (NTU)	T (°C)	Débit (m^3/s)
	Site 1	6,63	217	108	1,54	517	29,4	0,484
	Site 2	6,99	71	35	1,34	3092	26,5	2,3844
	Site 3	6,62	181	91	1,51	243	36,3	0,054
	Site 4	6,88	269	133	1,52	629	32,6	0,2425
12/10/2023	Site 5	6,68	273	136	1,46	562	30,8	0,5938
	Site 1	6,68	228	134	1,49	534	29,6	0,6752
	Site 2	6,87	67	47	1,37	3143	26,1	2,8219
	Site 3	6,67	178	82	1,42	287	31,4	0,1973
	Site 4	6,83	258	131	1,28	638	30,2	0,3228
26/10/2023	Site 5	6,62	284	138	1,31	614	30,4	0,7455
	Site 1	6,55	236	122	1,46	135	28,9	0,2771
	Site 2	6,84	86	43	1,42	240	26,8	1,7268
	Site 3	6,49	127	63	1,4	192,7	25,8	0,2304
	Site 4	6,72	164	123	1,33	132	26,1	0,3989
14/11/2023	Site 5	6,79	181	90	1,36	144	25,5	0,6474
	Site 1	6,41	218	114	1,42	104	28,4	0,2949
	Site 2	6,93	97	68	1,32	1504	28,4	2,2713
	Site 3	6,53	138	82	1,38	296	28,6	0,1057
	Site 4	6,69	158	97	1,3	143	27,3	0,47
07/12/2023	Site 5	6,66	193	96	1,34	152	26,8	0,7861
	Site 1	6,34	235	117	1,34	255	27,4	0,2949
	Site 2	6,89	80	41	1,28	711	27,9	2,2713
	Site 3	6,51	130	126	1,31	217	24,6	0,1057
	Site 4	6,65	153	106	1,26	266	25,7	0,47
21/12/2023	Site 5	6,61	180	96	1,23	315	25,4	0,7861
	Site 1	6,37	212	114	1,37	218	27,1	0,2103
	Site 2	6,62	77	39	1,3	512	27,2	1,2169
	Site 3	6,45	132	67	1,32	237	25,8	0,1231
	Site 4	6,68	159	92	1,28	273	25,4	0,2553
26/12/2023	Site 5	6,69	186	93	1,29	283	25,8	0,7778

III.2.2. Résultats des paramètres analysés au laboratoire par date d'échantillonnage et par site pendant la période culturale

Dates	Sites	PO_4^{3-} (mg/l)	NO_3^- (mg/l)	NO_2^- (mg/l)	P tot (mg/l)	DCO (mg/l)	DBO5 (mg/l)	M.E.S (mg/l)	NH_4^+ (mg/l)	$N\text{-}NH_4^+$ (mg/l)	$N\text{-}NO_3^-$ (mg/l)
	Site 1	0,018	2,664	0,036	0,96	60	34,8	300	117,1	95,985	0,602
	Site 2	0,174	2,679	0,019	0,89	130	88,4	1672	132,5	108,63	0,582
	Site 3	0,123	1,1659	0,0529	2,17	67	44,89	165	266,8	218,66	0,263
	Site 4	0,157	5,239	0,0405	1,06	187	123,4	452	306,2	251	1,183
12/10/2023	Site 5	0,197	3,5034	0,0691	2,07	168	114,2	428	318,3	260,9	0,791
	Site 1	0,023	3,041	0,038	1,03	68	40,12	286	119,8	98,216	0,686
	Site 2	0,172	2,734	0,019	0,97	136	84,32	1504	146,1	119,78	0,617
	Site 3	0,148	1,796	0,057	3,38	104	58,24	179	279,5	229,07	0,405
	Site 4	0,163	6,191	0,044	2,23	194	120,3	437	315,3	258,4	1,397
26/10/2023	Site 5	0,238	4,637	0,073	2,87	172	98,04	412	327,3	368,3	1,047
	Site 1	0,066	0,38	0,029	0,98	56	35,28	232	298,5	244,68	0,086
	Site 2	0,143	4,81	0,026	0,86	61	34,77	1289	314,8	258,07	1,085
	Site 3	0,101	0,12	0,035	2,99	93	63,24	192	274,9	225,35	0,026
	Site 4	0,088	0,31	0,018	2,07	72	46,8	483	236,8	194,13	0,07
14/11/2023	Site 5	0,114	0,89	0,036	2,63	132	76,56	451	296,9	243,3	0,2
	Site 1	0,232	4,33	0,017	1,08	64	43,52	122	448,2	367,36	0,98
	Site 2	0,352	3,2	0,031	0,94	58	34,22	412	418,2	342,83	0,72
	Site 3	0,216	6,61	0,02	2,93	98	63,7	81	461,8	378,51	1,49
	Site 4	0,247	8,51	0,034	2,33	89	58,74	119	428,2	351	1,92
07/12/2023	Site 5	0,236	8,32	0,039	2,41	102	56,1	142	447,3	366,62	1,88
	Site 1	0,238	4,5	0,018	1,12	68	35,36	134	348,18	334,8	1,02
	Site 2	0,368	4,06	0,032	1,02	67	36,85	464	492,6	403,8	0,92
	Site 3	0,231	7,86	0,02	3,46	128	81,92	103	430,7	353	1,773
	Site 4	0,253	9,96	0,035	2,81	80	54,4	133	447,95	367,17	2,25
21/12/2023	Site 5	0,249	9,91	0,048	2,92	167	101,9	168	412,4	338	2,24
	Site 1	0,231	3,839	0,032	1,09	62	42,16	136	358,5	324,98	0,867
	Site 2	0,352	3,895	0,031	0,98	73	42,34	467	440,7	361,23	0,879
	Site 3	0,212	7,8	0,035	2,39	103	63,86	81	459,7	376,84	1,761
	Site 4	0,257	8,914	0,046	2,63	87	58,29	236	438,9	359,76	1,922
26/12/2023	Site 5	0,244	9,004	0,039	2,47	109	61,04	148	393,8	322,75	2,033