



REPUBLIQUE DU BURUNDI
Ministère de l'Environnement, de l'Agriculture et de l'Elevage

*Centre d'Echange d'Information
sur la Biodiversité*

CHM-BURUNDAIS

ISSN 2519-0113 (Imprimé)

**Bulletin scientifique sur
l'environnement et la biodiversité**

ISSN 2519-0121 (En ligne)



*Bulletin Scientifique sur
l'Environnement et la Biodiversité*

Bulletin N°4



Bujumbura, Mars 2021

BULLETIN N° 4

Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité publié annuellement.

Siège de publication: Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Editeur: Centre d'Echange d'Informations en matière de Diversité Biologique, CHM (Clearing House Mechanism)

© OBPE-CHM. 2021

B.P. 2757 Bujumbura, Tél.: (257) 22234304

E-mail: obpe_burundi@obpe.bi, **Site web:** http://bi.chm-cbd.net

Comité de rédaction:

Rédacteur en Chef:

Prof BANGIRINAMA Frédéric, Ecole Normale Supérieure

Rédacteur en Chef Adjoint:

Prof. HABONIMANA Bernadette, Université du Burundi

Rédacteurs associés:

Ecologie : Dr. NDUWARUGIRA Déogratias, Université du Burundi

Conservation : Prof. MASHARABU Tatien, Université du Burundi

Valorisation des ressources naturelles : Dr NKENGURUTSE Jacques, Université du Burundi

Systématique : Prof. NDAYISHIMIYE Joël, Université du Burundi

Pollution : Dr. BIGUMANDONDERA Patrice, Université du Burundi

Risques et catastrophes naturelles : Dr. SINDAYIHEBURA Anicet, Université du Burundi

Comité scientifique:

1. Ecologie

Prof. NIYONKURU Charles, Université du Burundi

Dr. NDIHOKUBWAYO Noël, Ecole Normale Supérieure

Dr. SIBOMANA Claver, Université du Burundi

Dr. NDUWIMANA André, Université du Burundi

Dr. HAVYARIMANA François, Université du Burundi

Mr. NTASHAVU Dieudonné, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Mr. NDAYIZEYE Liévin, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Dr. MASUMBUKO Céphas, Université Officielle de Bukavu

Prof. BOGAERT Jan, Université de Liège

2. Conservation

Prof. NGEZAHAYO Frédéric, Ecole Normale Supérieure

Mr. MASABO Onesphore, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Mr. NZIGIYIMPA Léonidas, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Mr. FOFU Alphonse, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Prof. BIZURU Elias, Université Nationale du Rwanda

3. Valorisation des ressources naturelles

Prof. NDUWIMANA André, Université du Burundi

Prof. NTAARUTIMANA Vestine, Université du Burundi

Prof. NIZIGIYIMANA Libérate, Université du Burundi

Prof. NDAMANISHA Jean Chrysostome, Université du Burundi

Prof. NUSURA Hassan, Université du Burundi

CONTENU

Les déchets végétaux-énergie, une des solutions au problème énergétique au Burundi

Ndikumana Edouard, Niyongabo Gérard & Sinzinkayo Elie1-10

Conservation et restauration des zones riveraines des lacs du Nord au Burundi: un impératif pour faire face aux changements climatiques de la région de Bugesera

Bangirinama Frédéric & Dushimirimana Séverin..... 11-25

Contribution of *Terminalia catappa* L. to the survival of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in Bujumbura city, Burundi.

Ndayizeye Liévin & Sibomana Claver.....26-34

Pollution en ville de Bujumbura: ampleur, impacts préjudiciables et pistes de remédiation

Bigumandondera Patrice, Ndikuryayo Ferdinand & Nineza Claire.....35-47

Prof. BIGENDAKO Marie José, Université Lumière de Bujumbura

Prof. HAKIZIMANA Paul, Université du Burundi

Dr. NIYONGABO Désiré, Ecole Normale Supérieure

Dr. BANDUSHUBWENGE Denis, Université du Burundi

Dr. NIMENYA Nicodème, Université du Burundi

4. Systématique

Prof. NTAKIMAZI Gaspard, Université du Burundi

Prof. DUSHIMIRIMANA Séverin, Ecole Normale Supérieure

Dr. BANYANKIMBONA Gaspard, Université du Burundi

Msc. NDAYIKEZA Longin, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Mme MANIRAKIZA Odette, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Dr. SUSINI Marie-Lucie, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique

Mr. GAUGRY Yves, Flora Fauna & Man Ecological Services Ltd

Prof. MUNYULI M.B. Theodore, Department of Agriculture and Biology

5. Pollution

Dr. NSAVYIMANA Gaston, Université du Burundi

Dr. BISORE Simon, Ecole Normale Supérieure du Burundi

Msc. POLISI Alphonse, Office burundais pour la Protection de l'Environnement

Dr. LINA ALEKE Alex, Université Officielle de Bukavu

6. Risques et catastrophes naturels

Prof. SABUSHIMIKE Jean Marie, Université du Burundi

Dr. BAKUNDUKIZE Charles, Université du Burundi

Dr. NDAYISENGA Aloys, Université du Burundi

Dr. SINDAYIHEBURA Bernard, Université du Burundi

Dr. NDAYIRAGIJE Samuel, Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

Dr. NINEZA Claire, Université du Burundi



Les déchets végétaux-énergie, une des solutions au problème énergétique au Burundi

Ndikumana Edouard, Niyongabo Gérard & Sinzinkayo Elie

Ecole Normale Supérieure (ENS),

Boulevard Mwezi Gisabo, B.P. 6983 Bujumbura-Burundi

Auteur correspondant: Ndikumana Edouard, E-mail: ndikedo@yahoo.fr

Reçu: le 31 Octobre 2018

Accepté: le 11 Mars 2020

Publié: le 20 Mars 2020

RESUME

Mots-clés : Briquettes, pyrolyse, centres de cogénération, énergie électrique, chaleur

L'article examine la possibilité de transformer les déchets végétaux de toute sorte et d'utiliser ces déchets transformés dans la production de l'énergie. Les auteurs exposent et analysent, cas par cas, les méthodes de base de l'utilisation des déchets pour produire de l'énergie. Ils donnent certaines indications de résolution du problème de pénurie d'énergie basée sur la transformation des déchets et l'utilisation du gaz en résultant dans des centrales respectueuses de l'environnement qui utilisent du carburant diesel et de la biomasse. En fin, ils concluent par un constat que le recyclage des déchets des ménages (surtout les ménages urbains) et des entreprises industrielles permettra de résoudre non seulement le problème énergétique mais aussi les problèmes environnementaux, le bois et le charbon de bois occupant actuellement 100 pour cent dans la couverture de l'énergie domestique, 95 pour cent dans la balance énergétique nationale.

ABSTRACT

The article examines the possibility of transforming plant waste of any kind and using this transformed waste in the production of energy. The authors discuss and analyzes case by case the basic methods of using waste to produce energy. They give some indications of solving the problem related to energy shortage, based on the waste and the resulting use of gas in environmentally friendly plants that use diesel fuel and biomass. Finally, they conclude that the recycling of household waste (especially urban households) and industrial enterprises will solve not only the energy problem but also the environmental problems, wood and charcoal currently occupying 100percent in domestic energy coverage, 95 percent in the national energy balance.

Key words: briquettes, pyrolysis, cogeneration centers, electrical energy, heat

1. INTRODUCTION

Un des indicateurs du niveau de développement d'un pays est la production et la consommation annuelles d'énergie électrique; en d'autres mots le taux d'électrification. Malheureusement, pour le Burundi, ce taux est trop faible. Il est évalué légèrement supérieur à 2% (en 2012) par rapport à 16% en Afrique Sub-saharienne et 41% pour d'autres pays en voie de développement à faible revenu. La consommation d'électricité est de 25kwh/hab./an

quand la moyenne africaine est de plus de 500kWh (Assemblée nationale, 2011). L'écrasante majorité n'a pas accès aux sources énergétiques. L'offre en énergie est de loin inférieure à la demande de sorte que, pour satisfaire la demande d'au moins une partie de sa population, le Burundi se trouve dans l'obligation d'importer (tab. 2) une part non négligeable de l'énergie qu'il utilise (Assemblée nationale, 2011). Bref l'électricité burundaise est l'une des moins développées du monde (Манигомба

et Чичирова, 2017). Pour résoudre ce problème énergétique si aigu, en plus des projets de construction de nouveaux ouvrages hydroélectriques, le Gouvernement burundais propose d'autres voies de solution, notamment l'utilisation de la pyrolyse de la tourbe, des déchets de bois, de la biomasse agricole, des déchets ménagers et industriels (Manigomba et al, 2019). Une évaluation faite par des experts préconise que le volume annuel possible de déchets ménagers en 2016-2018 dans la ville de Bujumbura atteindrait environ 145 000 à 150 000 tonnes. Les réserves de tourbe explorées au Burundi représentent environ 60 millions de tonnes (Manigomba et al, 2019; Манигомба et Чичирова, 2017; Manirakiza, 2016).

A l'état actuel des choses, le Burundi a acquis une expérience considérable en matière de briquetage à travers des initiatives. Nous citerons à titre d'exemples, la carbonisation de briquettes à base de coques de café et de l'amidon de manioc comme liant, la carbonisation de la tourbe à travers les initiatives de l'ONATOUR (Office Nationale de la Tourbe) et une gamme d'expériences réalisées par les opérateurs privés qui emploient une large gamme de biomasses (Manirakiza, 2016 ; Ministère de l'Energie et des Mines, 2011).

Les technologies de pyrolyse et de gazéification sont anciennes, mais presque méconnues au Burundi. Elles ont été, par exemple, développées au 19^{ème} siècle pour la production de gaz de ville, ou encore pendant la seconde guerre mondiale pour produire du carburant. Ces procédés utilisent comme ressources le plus souvent directement du charbon (gazéification) ou du bois sur de petites unités (gazogènes de voiture) (Groupe de travail Pyrogaz, 2015).

Pour les ressources de type déchets, une première génération de procédés s'est développée à partir des années 1975/1980. Les déchets étaient traités en alternative à l'incinération, leur valorisation énergétique n'étant pas devenue encore une préoccupation majeure. Depuis plus d'une dizaine d'années, des procédés innovants de seconde génération pour les traitements des déchets qui produisent en premier lieu des composés énergétiques gazeux (syngaz), liquides (hydrocarbures) et solides (char ou coke) ont commencé à apparaître (Groupe de travail Pyrogaz, 2015).

Ainsi, le traitement des déchets dans le but d'obtenir de la pyrolyse et du biogaz permettrait de résoudre partiellement les problèmes du combustible énergétique et environnemental du pays (Manigomba et al., 2019). Les déchets, dans ce cas, ne sont pas considérés comme des débris dont il faut se débarrasser mais plutôt comme une matière première ou comme une ressource à valoriser ; leur pyrolyse/gazéification permettant l'optimisation de leur efficacité énergétique.

L'objectif de ce travail est donc :

- la valorisation des déchets végétaux en source d'énergie par la production d'un gaz par pyrolyse (gaz de synthèse ou syngaz) avec pour but d'alimenter des moteurs thermiques (groupes électrogènes) et, par là,
- la résolution partielle des besoins en énergie électrique et la sauvegarde d'un environnement sain.

2. METHODOLOGIE

Pour mieux mener notre recherche, deux méthodes ont été utilisées;

- La recherche documentaire. Elle a porté sur des ouvrages et articles généraux et spécifiques abordant la problématique de la gestion des déchets organiques. Cette démarche nous a permis d'avoir un aperçu général sur la capacité énergétique du Burundi, et la quantité de déchets-matière première déversés par la population plus particulièrement celle urbaine;
- L'observation du terrain. Des visites effectuées sur terrain ont permis d'inventorier les types de déchets utilisés comme matières premières devant subir un certain traitement et d'évaluer le niveau actuel de leur traitement et de leur utilisation comme source d'énergie calorifique ou électrique. Cette façon de procéder nous a poussé à nous orienter vers un domaine de traitement basé sur un des procédés modernes de la technique de gestion des déchets qui vise à permettre leur valorisation et qui consiste en la production de combustible gazeux à partir de ces déchets pouvant alimenter les centrales thermiques existants moyennant une modification de certains éléments du moteur de ces centrales.

3. DEROULEMENT DE LA RECHERCHE

3.1. Evolution de la production de l'énergie électrique au Burundi.

Le secteur électrique burundais souffre de l'absence d'investissement significatif depuis vingt ans (comptés à partir de 1986) (Assemblée nationale 2011). La production nationale d'électricité est déficitaire par rapport aux besoins exprimés par la population burundaise dans son ensemble. Alors que l'on enregistre une progression linéaire de la demande liée à l'augmentation de la population, le Burundi se retrouve sans construction de nouvelles infrastructures fournissant l'électricité jusqu'en 2016 (Nsavyimana, 2017 ; Assemblée nationale, 2011); le manque d'investissements suffisants dans ce secteur explique ce phénomène.

Par exemple, durant la période 2014-2015, le réseau électrique national accusait un déficit de puissance de 22 MW (Ministère de l'énergie et des mines, 2011 ; Nsavyimana, 2017). Dans le cas général, ce déficit totalise 10 à 25MW voire plus selon les saisons (Manirakiza, 2016)

La production nationale d'électricité, d'une capacité totale de 45 MW en 2012, est essentiellement assurée par des centrales hydroélectriques, complétées par quelques centrales thermiques (Ministère de l'énergie et des mines, 2011). Les tableaux 1 et 2 montrent les ouvrages de la production nationale d'énergie électrique et les dates de mise en service pour le premier et la quantité d'énergie électrique importée pour le deuxième. Le tableau 3 donne la relation entre l'offre et la demande en énergie électrique.

Tableau 1: Capacité de production de l'énergie électrique au Burundi

Dénomination CHE	Année de mise en service	Province	Puissance installée (MW)
Rwegura	1986	Kayanza/Cibitoke	18,00
Mugere	1982	Bujumbura rural	8,00
Ruvyironza	1980/1984	Gitega	1,05
Marangara	1986	Ngozi	0,28
Nvemanga	1988	Bururi	2,80
Kavenzi	1984	Muyinga	0,80
Gikonge	1982	Muramvva	1,00
Buhiga	1984	Karuzi	
Centr. Therm.	1997	Bujumbura	5,50
Total			32,88

Source : REGIDESO, 2015

Tableau 2: Burundi-Energie électrique importée

Source	Année de mise en service	Importations (en MW)
RUSIZI I (SNEL)	1957	1,8
RUSIZI II (SINELAC)	1989	13,2
Total		15,0

Source : REGIDESO, 2015

Ces derniers temps des efforts visant l'augmentation de la production en énergie électrique ont été consentis. Nous citons pour exemple les centrales de Jiji-Mulembwe en construction, le barrage de Kaburantwa, etc. Néanmoins malgré tous ces efforts, l'offre reste toujours inférieure à la demande (tab. 3).

Tableau 3: Analyse globale de la demande en capacité et en énergie (Hors exploitation minière).

A	2016	2017	2018	2019	2020
DE (Gwh)	289	320	354	393	435
DC (Mw)	111	123	136	151	167

A : Année, DE : Demande énergie, DC : Demande capacité.

Source : Etude régionale du système interconnecté NELSAP

3.2. Une meilleure exploitation des déchets végétaux-énergie comme solution alternative

Les déchets végétaux tant ménagers qu'industriels ainsi que la tourbe, judicieusement exploités, peuvent être la réponse au problème de carence énergétique au Burundi. Malheureusement, la tourbe, dans son état naturel est difficile à utiliser du fait de son odeur désagréable pour la cuisson et des fumées nocives de combustion. Sa carbonisation seule ou mélangée à des déchets agricoles dans de petites unités décentralisées serait une des solutions qui, et selon nous, lui permettrait de gagner une part du marché domestique de la cuisson (Manirakiza, 2016 ; Ministère de l'énergie et des mines, 2011).

La production de l'énergie électrique et de la chaleur à partir des déchets peut se faire de deux manières différentes (Manirakiza, 2016 ; Mizero et al, 2015) :

- Les déchets à l'état naturel ou transformés (briquettes) sont directement utilisés pour le chauffage dans les ménages ou comme combustible d'une unité de production d'électricité ; par exemple comme combustible d'une chaudière pour les turbines à vapeur ou ;
- Les déchets transformés en briquettes combustibles subissent un deuxième traitement permettant d'en dégager un gaz combustible (gaz de synthèse ou syngaz).

Ces processus de transformation peuvent être représentés par le schéma combiné de la figure 1. Des déchets végétaux, par compactage, on obtient des briquettes utilisées comme combustible. La transformation de ces briquettes par pyrolyse donne un gaz de pyrolyse (gaz de synthèse ou syngaz) qui est lui aussi un combustible.

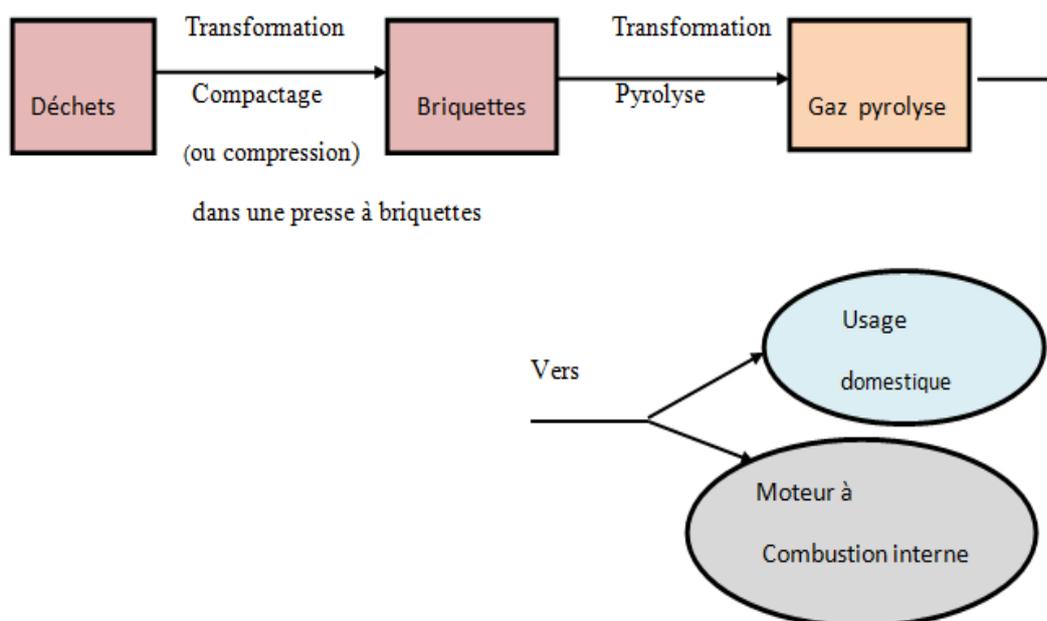


Fig. 1: Schéma du processus de transformation des déchets végétaux en source d'énergie

La transformation de ce gaz en énergie thermique uniquement ou en énergie thermique et énergie électrique peut se faire soit:

- Par combustion de ce gaz pour usage domestique ou dans un Moteur à Combustion Interne (MCI) ou dans d'autres installations à combustions externes génératrices d'énergie électrique;

- Par transformation de l'énergie qu'il contient en énergie cinétique puis mécanique dans une installation de turbine à gaz.

Le bois et le charbon de bois occupent presque plus de 94% des ménages dans la couverture de l'énergie domestique au Burundi (Assemblée Nationale, 2011 ; Ministère de l'énergie et des mines 2011; Nsavyimana, 2017). Comme notre souci est de chercher à résoudre partiellement problème de carence énergétique ci-haut exposé tout en préservant l'environnement, la variante d'un gaz

produit utilisé pour usage domestique ou comme combustible des Moteurs à Combustion Interne nous intéresse le plus.

Les schémas de gazéification utilisés dans la technique varient d'un producteur à l'autre. Ce sont les procédés tels qu'à lit fixe, à lit fluidisé statique ou entraîné, à contre-courant, à Co-courant et d'autres.

Le gaz ainsi obtenu contient de l'énergie chimique. Par combustion dans un moteur thermique, l'énergie chimique est transformée en énergie calorifique ou thermique puis en énergie mécanique entraînant ainsi un générateur de courant électrique branché sur ce moteur.

En qualité de combustible, nous envisageons d'utiliser les briquettes qui, d'une part, sont produites sur place et sont actuellement largement utilisées dans la production d'énergie à petite échelle au Burundi (Манигомба et Чичирова, 2017) et d'autre part parce que elles peuvent être obtenues à partir de déchets issus de la transformation de certains produits agricoles tels que le café, le riz, les noix de palmier à huile etc. Pour plus d'autonomie, nous trouvons qu'il est préférable de produire soi-même les briquettes au lieu de les acheter ailleurs.

3.3. Matière première pour briquettes et son niveau d'utilisation dans la production énergétique.

Les parches de café, les balles de riz, les déchets de coton, la bouse de vache, les vieux papiers, les ordures municipales, les déchets ou copeaux de bois, la tourbe, la sciure, les coques d'arachides, les coques de noisettes de palmes... sont certaines des matières premières utilisées pour fabriquer des briquettes combustibles (Manirakiza, 2016). Les sources d'approvisionnement en la matière sont nombreuses et variées. Par exemple, « Un habitant de la ville de Bujumbura produit en moyenne 0,6kg/jour soit 217 kg/an en mai 2011 (Mizero et al, 2015 ; Kapepula et al, 2016 ; Манигомба et Чичирова, 2017) et, selon les experts, entre 2016-2018, le volume annuel de déchets dans la même ville de Bujumbura aurait atteint environ 145 000 à 150 000 tonnes (Manigomba et al, 2019).

A ces déchets municipaux s'ajoutent les déchets en provenance des usines de traitement du café et des unités de décorticage du riz, les coques des noisettes fournis par les propriétaires des plantations de palmiers à huile et d'autres. Le tableau 4 montre la production des déchets solides municipaux dans quelques villes du monde comparativement à celle de Bujumbura.

Tableau 4 : Production des déchets solides dans quelques villes du monde et à Bujumbura Mizero et al, 2015).

Ville	Kg/habitant/an
Yaoundé	256
Oran	350
Paris	523
Vienne	522
Québec	400
Bujumbura	217
Moyenne européenne	600
Moyenne tiers monde	150 à 200
Moyenne américaine	700

Il ressort de ce tableau que la production journalière de déchets par habitant correspond à la norme de pays en développement qui varie de 0,1 kg/j à 0,6 kg/j (Kapepula et al, 2016) soit un rejet annuel de 36,5 à 217 kg; la quantité d'ordures ménagères produite par une municipalité variant en fonction du niveau de vie de la population, du mode de vie des habitants et du climat et de la saison. Pour les ménages, elle varie selon la taille du ménage, le niveau de vie du ménage et de l'alimentation.

Le problème énergétique et par là le problème de déforestation au Burundi est tellement inquiétant qu'une part de la population se regroupe pour essayer d'en trouver partiellement une solution. Par ailleurs, suite à l'abondance des déchets surtout de balle de riz et de parche de café, la fabrication des briquettes de charbon a été proposée comme l'une des filières de valorisation des déchets (Manirakiza, 2016). C'est dans ce cadre qu'on a vu naître des unités de traitement des déchets qui produisent des briquettes pouvant remplacer valablement le bois ou le charbon de bois lors de la cuisson. De nos visites sur terrain, il ressort, à titre d'exemple, que:

- L'Association pour le Développement et la Lutte contre la Pauvreté (ADLP) est la première organisation privée à s'impliquer dans la gestion des déchets urbains. Les premiers morceaux de charbon ont été produits en août 2006.
- L'entreprise Burundi Quality Stoves (B.Q .S.) mixte d'abord différents déchets, ce qui lui permet de produire des briquettes avec une valeur calorifique très élevée (entre 3900 et 4000 kCal) par rapport au bois de chauffage (entre 3000 et 3800 kcal). Dans ce mélange, la part de la parche

du café prime sur les autres matières et occupe un taux de 40%, taux dicté par son pouvoir calorifique plus élevé. Il faut environ 1 tonne de matières premières pour avoir 900 kg de briquettes, la capacité de sa production allant jusqu'à 90 tonnes de biomasse renouvelable par jour avec trois machines de compilation.

- L'ETS Ndikumana Arnaud fait de même. L'analyse des échantillons des briquettes dans le laboratoire de Chimie agricole de l'ISABU effectuée sur demande de l'entreprise, suivant les procédés connus et standards (Chvetz et al, 1969), a permis de déterminer l'humidité, la teneur en cendres totales et la teneur en matières volatiles. Les résultats relatifs à ces analyses sont donnés dans le tableau 5.

Tableau 5: Résultats des analyses.

Echantillon	No Labo	Humidité, %, à 105°C	Cendres totales, % d'échantillon sec à 750°C	Matière volatile, % d'échantillon sec à 950°C
Briquette	D597	6,91	10,35	70,65

Nous avons envoyé, pour traitement par pyrolyse dans un laboratoire de l'Université de l'État de Kazan en Fédération de Russie, des échantillons de briquettes que nous avons produites dans cette entreprise (fig.2b). Les résultats du déroulement de l'expérience nous ont été envoyés par images vidéo à partir du laboratoire et ils ont prouvé un dégagement de gaz et ce gaz a brûlé lorsqu'on l'a enflammé. Nous pouvons donc nous permettre d'affirmer que ce gaz peut servir de combustible pour un moteur thermique et pour un usage domestique.

Un combustible solide est techniquement caractérisé par son indice de matière volatile et sa valeur énergétique ou pouvoir calorifique. On peut donc caractériser le combustible solide en mesurant le taux d'humidité, le taux de matières volatiles et les cendres. L'humidité a une influence notable sur le pouvoir calorifique utile. Plus un combustible est humide, moins il est inflammable. En outre, la teneur élevée en matières volatiles ou en cendre influe aussi négativement sur la qualité du combustible (Manirakiza, 2016). Le tableau 6 donne une

comparaison des différents matériaux quant à leur teneur en énergie.

Tableau 6: Le potentiel théorique de déchets de récoltes du Burundi (Ministère de l'énergie et des mines, 2011)

Culture	Résidus	Pouvoirs calorifiques inférieurs (MJ/Kg)
Arachide	coque	17
Sucre (canne)	bagasse	19,37
Huile de palme	déchets	16
Coton	tiges	18,3
Mil	déchets	18
Maïs	déchets	18
Sorgho	déchets	18
Riz	déchets	12
Café	déchets	17,9
Manioc	tiges	19

Il découle de ce tableau que la teneur en cendre de la briquette produite par l'ETS Ndikumana Arnaud est de loin inférieure à celle de la tourbe qui varie de 25,81 à 4,5.% (Manirakiza 2016). Ainsi, nous concluons que c'est un combustible de meilleure qualité que la tourbe par sa teneur en énergie. Son pouvoir calorifique est donc supérieur à celui de la tourbe voire celui du bois de chauffage (de 12, 56 à 15,909 Mj/kg), mais inférieur à celui du charbon de bois de chauffage (27 Mj/kg (Ministère de l'énergie et des mines, 2011)). Il en est de même pour la teneur en énergie des éléments du tableau 5 à l'exception des déchets de riz.

4. RESULTATS

Les visites sur terrain nous ont permis d'adopter les étapes de la production des briquettes à partir des déchets végétaux et de proposer un schéma de transformation de ces briquettes en gaz combustible. Le but visé dans la recherche est de mettre à la disposition des consommateurs un combustible substitutif du gasoil pour assurer le fonctionnement des groupes électrogènes existants, en particulier ceux de la REGIDESO.

4.1. Description de la chaîne de production des briquettes à partir des déchets végétaux.

La technologie de production des briquettes est constituée de plusieurs opérations et elle est la même chez tous les producteurs, seule la technique de production diffère :

- L'opération première de préparation de la matière première pour la fabrication des briquettes est le déchetage ou le broyage des déchets combustibles. Elle se fait souvent à la main ou à l'aide d'un outil aratoire : une machette ou une hache par exemple (dans le cas où les matériaux à préparer sont des branches, des rameaux et de la paille), un engin comme broyeur de paille n'étant utilisé que lors d'une production à grande échelle.
- La deuxième opération consiste à soumettre les produits résultant de la précédente opération à un séchage naturel dans des aires bien aérées et protégées de la pluie. Noter que le séchage dure longtemps.
- La troisième opération consiste à mélanger les déchets secs. La qualité du produit fini dépend des types de déchets mélangés et de la proportion de chaque élément dans le mélange. D'après les résultats de nos essais, une briquette avec une seule catégorie de déchets n'est pas consistante. Un ajout de liants secs ou parfois humides permet d'obtenir une consistance et une valeur calorifique optimales ou de conférer au matériau une certaine plasticité. L'huile de vidange, ajoutée aux déchets et dosée avec beaucoup de soin, permet elle aussi d'accroître la valeur calorifique des briquettes.
- La quatrième opération consiste à comprimer les déchets pour en tirer des briquettes. Une photo d'une unité de production des briquettes prise lors de nos visites de certaines entreprises est représentée sur la figure 2 et son schéma de principe sur la figure 3.
- La cinquième et dernière opération est le séchage dans des abris bien aérés. Cette opération est combinée avec la précédente pour certaines unités de production. Là où l'opération de séchage est obligatoire, le temps nécessaire peut aller de quelques jours à plusieurs mois. Cela dépend du liant employé et des conditions de séchage. Le séchage accroît lui aussi, dans des proportions notables, le pouvoir calorifique des briquettes. L'élément principal de l'unité de production (fig. 2) est un propulseur spiral (une vis sans fin 6) monté dans un boîtier 9 (corps de la presse à briquettes) et entraîné par un moteur électrique 1 par l'intermédiaire d'une transmission par courroie 8. Le moteur électrique est commandé à l'aide d'une boîte de commande 2. Le déplacement de l'unité de production d'un poste de travail à un autre est rendu possible par des roues mobiles 3.
- Lorsqu'on charge la trémie d'alimentation 7 d'un mélange de déchets bien secs, une vis sans fin 6 entraîne ce mélange progressivement à travers l'espace entre la vis et le boîtier (fig.3). A l'intérieur du boîtier, le mélange se comprime suite à un mouvement de rotation que lui imprime la vis autour de son axe. Grâce au mouvement de translation le long de l'axe de la vis, le mélange comprimé sort en passant dans une moule 4 qui lui donne une forme de la briquette voulue. Un anneau de chauffage (des résistances) 5 monté sur la moule sèche complètement la briquette de sorte qu'elle devient directement utilisable après production sans nécessiter un séchage préalable.

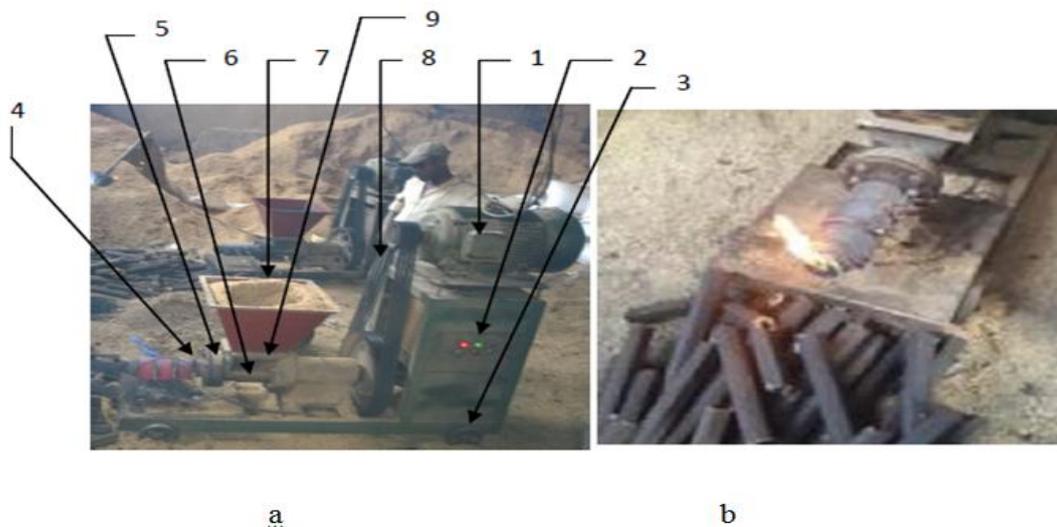


Fig.2: Unité de production des briquettes utilisée lors de notre étude (a) ; échantillons de briquettes fabriquées.

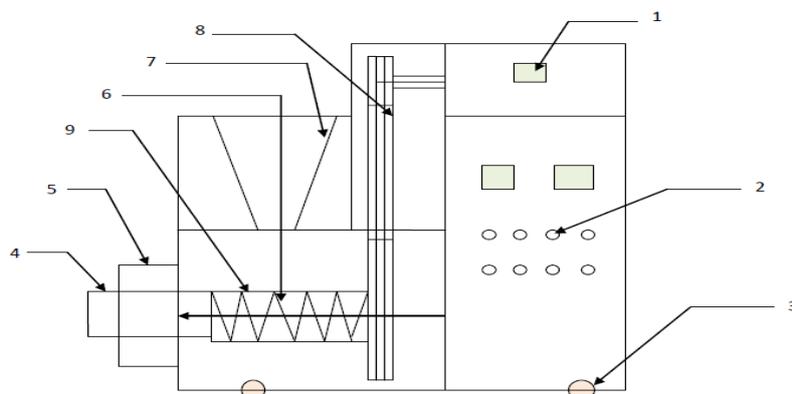


Fig. 3: Schéma de principe de la structure : 1-moteur électrique ; 2-boîte de commande ; 3-roues mobiles ; 4-moule ; 5-anneau de chauffage ; 6-vis sans fin ; 7-trémie d'alimentation ; 8-transmission par courroie ; 9- boîtier.

4.2. Obtention du Combustible pour Moteurs à Combustion Interne (MCI) à partir des briquettes végétales

Les expériences de traitement par pyrolyse des briquettes fabriquées à partir des déchets végétaux, menées dans le laboratoire utilisé, ont abouti à la production du gaz combustible (gaz de synthèse ou Syngaz) qui, produit à grande échelle, servirait comme combustible substitutif du gasoil pour les moteurs diesel. Il découle de notre étude qu' à partir d'un kg de déchets, on obtient 0,9 kg de briquettes.

Cependant, la combustion directe des briquettes pour produire de l'électricité nécessite tout un complexe d'installation tel qu'une chaudière à vapeur, une turbine à vapeur et un générateur de turbine qui, dans le présent cas, est tout simplement inenvisageable. Le rendement électrique d'une pareille installation classique est d'environ 35%. L'efficacité est donc faible.

La pyrolyse et la gazéification des briquettes que nous envisageons est une solution fiable pour améliorer cette efficacité. L'utilisation, dans des

centrales de cogénération (groupe électrogène par exemple), du gaz de synthèse produit à partir de ces briquettes combustibles permet de maximiser l'énergie des déchets organiques. La cogénération consiste à produire et à utiliser simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'une même énergie primaire et au sein de la même installation. Le rendement énergétique global peut atteindre 85%. La pyrolyse de 400 kg de déchets organiques à l'aide d'un dispositif de cogénération peut produire, selon notre recherche documentaire, à peu près 2,0 MW d'énergie électrique. En utilisant donc une (des) unité(s) de cogénération d'une capacité (totale) de 150- 200 MW, nous trouvons qu'il est possible de résoudre partiellement la crise énergétique que connaît le Burundi ; soit le déficit totalisant, comme nous l'avons mentionné plus haut, 10 à 25MW voire plus selon les saisons. Quant à la chaleur produite (300-400°C), elle peut être utilisée pour chauffer le gazéifieur ou une chaudière. Le schéma de production de l'énergie électrique et de la chaleur à partir des briquettes combustibles est représenté sur la figure 4.

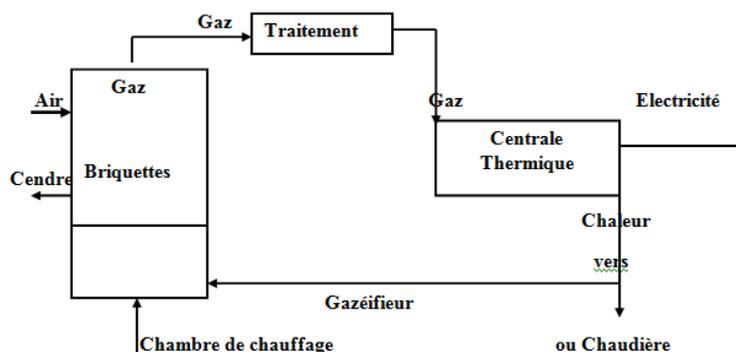


Fig.4: Schéma d'installation de pyrolyse.

Des briquettes obtenues à partir des déchets végétaux sont chauffées dans un gazéifieur à une température supérieure à 850°C, en présence d'une quantité limitée d'air (défaut d'oxygène). Là, les briquettes subissent une certaine transformation conduisant à la formation d'un gaz de pyrolyse (gaz de synthèse ou Syngaz). Les résidus de la transformation (cendres) sont déchargés du gazéifieur (nettoyage). Le gaz ainsi formé subit un traitement (filtrage) pour réduire les émissions polluantes. Le gaz purifié va alimenter une centrale thermique. La centrale thermique (unité de cogénération) produit, en plus du courant électrique (produit recherché), de la chaleur. Cette énergie supplémentaire qu'est la chaleur sera utilisée soit pour chauffer le gazéifieur, soit pour chauffer une chaudière.

5. DISCUSSION ET CONCLUSIONS

5.1. Discussion

Le travail met en évidence le faible niveau de production nationale d'énergie électrique et l'incapacité croissante de la Régie de Production et de Distribution d'eau et d'électricité du Burundi (REGIDESO) de satisfaire en énergie la population nécessaire. Actuellement, malgré l'exploitation de la centrale thermique, les abonnés ont besoin plus de l'énergie électrique fournie.

Au regard de la vétusté des infrastructures de centrales électriques, la croissance vertigineuse de la population urbaine et l'augmentation des industries/usines, l'Etat doit redoubler d'efforts dans l'investissement énergétique. Une autre alternative, il faut qu'il encourage les entrepreneurs à innover en recourant à la valorisation des déchets notamment les déchets végétaux.

L'installation d'une unité de production d'un combustible à partir des déchets végétaux réalisée suivant le schéma proposé (fig. 4) procure beaucoup d'avantages. D'abord, le combustible est produit localement à partir des déchets végétaux que l'on trouve sur tout le territoire burundais. Ensuite, le combustible produit l'énergie électrique et l'énergie calorifique. Enfin, ce combustible proposé vient pallier le déficit en énergie électrique qu'a l'entreprise publique, la REGIDESO et il contribue à la sauvegarde de l'environnement. La seule entrave est que son utilisation implique une modification de certains éléments du moteur thermique des groupes électrogènes actuellement fonctionnels.

5.2. Conclusion

Au terme de notre étude intitulée « **Les déchets végétaux-énergie, une des solutions au problème énergétique au Burundi** », le nœud du travail se rapporte sur la valorisation des déchets végétaux dans la production de l'énergie.

Les bilans énergétiques du Burundi sont dominés par les énergies traditionnelles à savoir le bois, le charbon de bois et les déchets végétaux. La production nationale d'électricité est déficitaire, le Burundi se retrouve dans l'obligation d'importer l'énergie.

Notre recherche propose un procédé de valorisation des déchets végétaux. On produit d'abord un combustible à partir des déchets végétaux qu'on compacte (briquettes). Ensuite, la briquette combustible est chauffée à une température de plus de 800°C. On récupère le gaz, on le filtre et enfin il est utilisé dans la production de l'énergie électrique et l'énergie calorifique.

BIBLIOGRAPHIE.

Assemblée nationale, 2011. Rapport d'information sur la problématique de l'énergie et de l'eau au Burundi Bujumbura. Commission de la bonne gouvernance et de la privatisation.

Chvetz I., Kondak M. et autres, 1969. *Thermique générale*. Edition MIR. Moscou.

Groupe de travail Pyrogaz, 2015. Pyrolyse et gazéification, une filière complémentaire pour la transition énergétique et le développement de l'économie circulaire. Note stratégique sur le développement de la filière pyrogazéification.

Kapepula L., Muyisa S., Jung C.G., 2016. Contribution à l'état de lieux de déchets solides ménagers dans la ville d'Uvira, Sud-Kivu, République Démocratique du Congo.

Manigomba J.A., Chichinova N.D., Gruzdev V.B., Ndikumana E. and Lyapin A.I., 2019. Prospect for biomass energy use in the republic of Burundi.

Манигомба Ж.А., Чичирова Н.Д., 2017. Перспективы применения органических и промышленных отходов в энергетике республики Бурунди // Труды Академэнерго. 2017. № 2. С 107-110.

Manirakiza N., 2016. Etude comparative des briquettes combustibles à base des déchets municipaux produits par différents procédés. Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme

de Master complémentaire en Sciences de l'Environnement

Ministère de l'énergie et des mines, 2011. Elaboration de la stratégie sectorielle pour le secteur de l'énergie au Burundi : Rapport final provisoire. Direction Générale de l'énergie et de l'eau.

Ministère de l'énergie et des mines, 2011. Lettre de politique énergétique. Direction Générale de l'énergie et de l'eau.

Mizero M., Ndikumana Th., & Jung G, 2015. Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura. *Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité*.

Nsavyimana A., 2017. Le déficit en énergie électrique du Burundi va continuer d'augmenter d'ici 2017.

REGIDESO, 2015. Rapport mensuel d'activités du mois d'aout 2015. Service équipement électricité.

REGIDESO, 2015. Rapport de production d'électricité entre 1996. -2014. Service équipement électricité.



Conservation et restauration des zones riveraines des lacs du Nord au Burundi: un impératif pour faire face aux changements climatiques de la région de Bugesera

Bangirinama Frédéric & Dushimirimana Sévérin

Ecole Normale Supérieure (ENS)

Boulevard Mwezi Gisabo, B.P. 6983 Bujumbura-Burundi

Auteur correspondant: Bangirinama Frederic, E-mail: bangifre2003@yahoo.fr

Reçu: le 15 Janvier 2020

Accepté: le 31 Mars 2020

Publié: le 25 Avril 2020

RESUME

Une étude de la biodiversité floristique des zones riveraines des lacs du Nord du Burundi a été réalisée dans trois stations respectivement la zone lacustre côtière, la partie côtière marécageuse et la terre ferme. Les résultats mettent en évidence des indicateurs de la dégradation des qualités écologiques des lacs du Nord du Burundi. Nous citons le développement d'une végétation d'espèces envahissantes comme *Lantana camara* sur la petite île du lac Rwihinda, l'établissement d'*Eichornea crassipes* sur le lac Rweru et le développement d'un tapis flottant de *Nymphaea lotus* et *Nymphaea caerulea*. Une action restauratrice par la végétalisation des berges en privilégiant les espèces autochtones de la région de Bugesera est à entreprendre.

Mots-clés : Biodiversité floristique, Dégradation, Indicateurs, Restauration, Lacs du Nord (Burundi).

ABSTRACT

A survey of floristic biodiversity of the coasts of lakes of the North to Burundi has been carried out in three stations respectively the coastal area, the swampy areas and the earth area. Results highlighted indicators of the degradation of the ecological qualities in the lakes of the North to Burundi. We mention the development of invasive species vegetation such as *Lantana camara* on the small island of the Rwihinda lake, the establishment of *Eichornea crassipes* on the Rweru lake and the development of a floating association of *Nymphaea lotus* and *Nymphaea caerulea*. To restore the coastal vegetation using the local native species is to undertake.

Key words: Floristic biodiversity, Degradation, Indicators, Restoration, Lakes of the North (Burundi).

I. INTRODUCTION

Les zones humides comme les marécages, les tourbières et les lacs stockent environ 30 % de l'eau douce du globe. Les marais, les lacs et les étangs stockent l'eau après la pluie et la libèrent en flux réguliers pendant les périodes sèches. De même, les végétations des zones et de marais côtiers protègent les berges de l'érosion et de la perte de fertilité des bassins versants. La perte des zones humides double donc les impacts du changement climatique.

Le paysage de la région de Bugesera fut jadis un lieu de prédilection (hotspot) de la biodiversité du Burundi (Nzigidahera *et al.*, 2005). L'atlas du Burundi l'aura montré sur ses cartes de distribution de la faune et de la flore (MRAC, 1981). Les générations actuelles et futures n'ont pas eu ou n'auront plus la chance d'observer en milieu naturel les buffles, les rhinocéros, les lions et les léopards. De plus, les savanes boisées à *Acacia polyacantha*, les bosquets xérophiles, les vastes marais impénétrables autour des lacs du Nord et les galeries forestières à *Maesopsis eminii*, bref, les différentes formations végétales de Bugesera qu'avait décrites Liben en 1960.

Les bassins versants ayant perdu en grande partie la fertilité ou étant simplement devenues impropres à l'agriculture, les populations ont fait recours aux défrichements des marais pour étendre leur agriculture. Les terres des zones côtières des lacs du Nord ont été mises en cultures de façon anarchique oubliant leurs multiples rôles dans les cycles hydrologiques et climatiques comme zones tampons. Les marais de Bugesera constituent des barrières contre les alluvions et les colluvions en provenance des bassins versants ou un centre d'épuration important pour les eaux qui coulent vers les lacs de la région (Nzigidahera & Fofu, 2005). Les grandes famines et sécheresses prolongées qu'a connues la population de Bugesera depuis les années 2004-2005 ont suscité l'attention des chercheurs et des décideurs politiques.

Cette étude veut montrer qu'une exploitation rationnelle des marais doublée d'une restauration écologique des paysages des zones côtières des lacs du Nord permettrait le rétablissement des propriétés écologiques de la région. Les stratégies d'aménagement qui seront proposées permettront de promouvoir le rôle des zones humides dans la réduction des impacts du changement climatique. La réhabilitation de ces zones côtières pourrait, en plus de son histoire géologique qui a permis la confection d'un complexe marécageux avec un système lacustre dans un environnement rapproché et unique au Burundi, faire du paysage du de Bugesera un bon endroit pour l'écotourisme.

II. MATERIEL ET METHODES

II.1. Sites d'étude

La région naturelle du Bugesera se trouve à l'extrême Nord du pays entre 2° 18' et 2° 30' de latitude Sud et entre 29° 56' et 30° 33' de longitude Est. Elle s'étend sur la province de Kirundo avec une superficie de 187.060 ha. Elle est limitée au Sud par la province de Ngozi et à l'Est par celle de Muyinga et au Nord par le Rwanda. La région naturelle de Bugesera forme une dépression d'altitude inférieure à 1600 m. Il est constitué de grandes ondulations séparées par des vallées marécageuses et des lacs.

A l'Est de la dépression de Bugesera, se localisent les lacs Rweru et Kanzigiri qui communiquent grâce à une vallée marécageuse de Ruduhira. A l'Ouest, se trouvent dans les vallées marécageuses des affluents d'Akanyaru de nombreux lacs : Rwhinda, Narungazi, Mwangere, Nagitamo, Gacamirindi et Cohoha. Ces 8 lacs occupent une superficie d'environ 16 010 ha soit environ 7,2 % de la superficie du Burundi (Corsi *et al.* 1986).

Selon les données de la station climatologique de Kirundo, la température de la région de Bugesera est très élevée comparativement à l'ensemble du pays. Les moyennes mensuelles oscillent autour 26°C avec des amplitudes thermiques diurnes assez élevées soit 13,2°C à Kirundo. Les pluies se répartissent très irrégulièrement sur la région. A Murehe, les précipitations sont évaluées à 700 mm par an contre 1000 mm par an à Kirundo.

Ces lacs hébergent une faune ichthyologique des lacs des marécages qui se contente comme source de nourriture de la vase organique riche en bactéricides (Photos 1-6, lac Rweru).



Photo 1: *Protopterus aethiopicus* (Imamba) Photo 2: *Clarias liocephalus* (Imare)



Photo 3 : *Clarias gariepinus* (en blanc, Imare) Photo 4 : *Tilapia rendalli* (Ikoke)



Photo 5 & 6 : *Barbus pellegrini* (Idari)

Cette étude concerne la biodiversité floristique des paysages des quatre grands lacs du Nord du Burundi (Figure 1) à savoir Rweru, Cohoha, Kanzigiri et

Rwihinda. Le tableau 1 présente les caractéristiques de ces lacs.

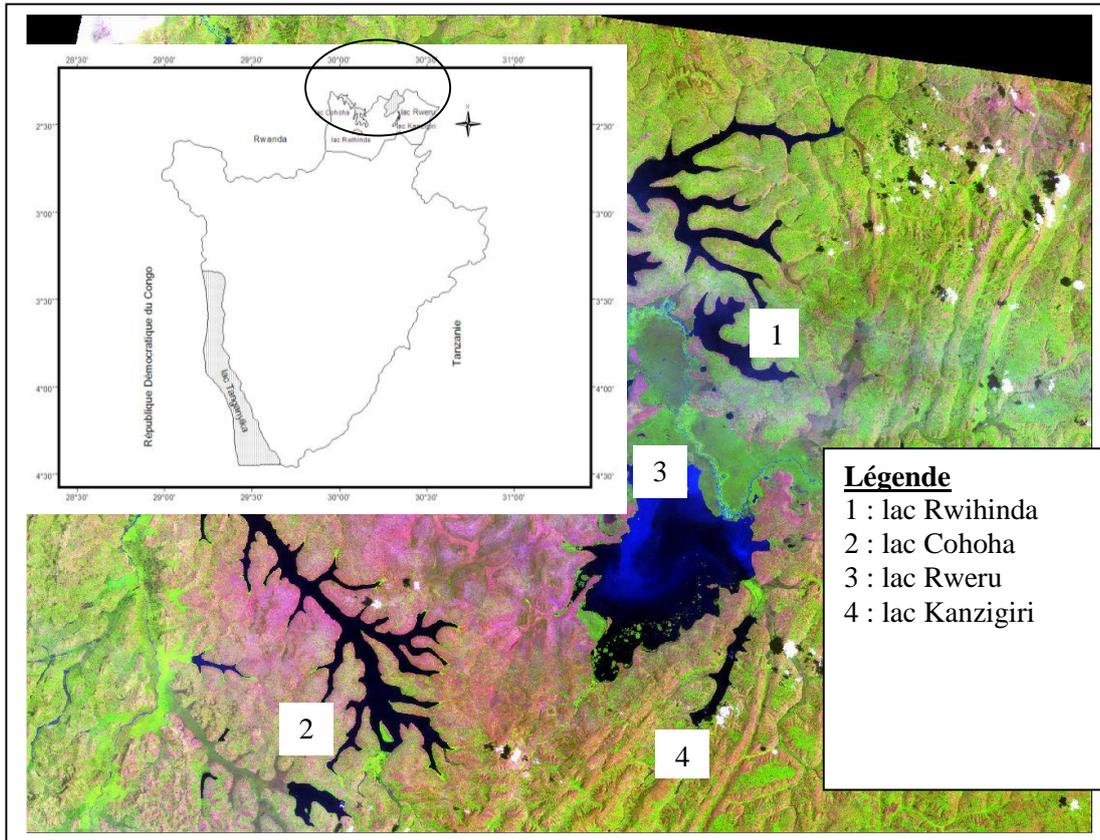


Figure 1 : Localisation des Rweru, Cohoha, Kanzigiri et Rwihinda dans la région de Bugesera au Nord du Burundi

Tableau 1 : Caractéristiques des lacs Rweru, Cohoha, Kanzigiri et Rwihinda (Corsi *et al.*, 1986).

Lac	Longitude (E)	Latitude (S)	Altitude (m)	Superficie (ha)
Rweru	30°19'09''	2°22'57''	1322	10200
Cohoha	30°06'23''	2°25'48''	1428	7850
Kanzigiri	30°21'40''	2°27'49''	1345	750
Rwihinda	30°09'30''	2°32'50''	1356	450

II.2. Collecte et traitements des données

Pour la collecte des données, une excursion en bateau sur chacun des quatre lacs nous a permis de prendre des photos des zones côtières. Des échantillons des plantes flottantes et immergées ont été également récoltés. Un inventaire floristique a été réalisé dans trois stations respectivement la zone lacustre côtière, la partie côtière marécageuse et la terre ferme. La méthode phytosociologique sigmatiste de Braun-Blanquet (1932) a été utilisée en tenant compte de l'homogénéité floristique de la station.

Les formations végétales ont été décrites sur base de leur physionomie et des espèces dominantes. La nomenclature des associations observées a suivi la révision faite par Schmitz (1988). Après

identification des spécimens, la nomenclature adoptée est celle de Lebrun & Stork (1991, 1992, 1995, 1997) complétée par la base des données des plantes d'Afrique tropicale en ligne (Lebrun & Stork, 1991-2010).

Le recours à des indicateurs est une excellente façon d'évaluer le niveau de stress dans différents secteurs et de suivre l'amélioration ou la dégradation des conditions écologiques. Nous nous sommes servi de la présence/absence et de l'écologie de certaines espèces pour évaluer le degré de dégradation des paysages des lacs du Nord du Burundi mais également pour trier les espèces locales à haute valeur restauratrice pour proposer des stratégies d'un plan global de la restauration de toute la zone côtière.

III. RESULTATS

III.1. Diversité floristique

III.1.1. Lac Rwihinda

Le lac Rwihinda appelé également « lac aux oiseaux » présente trois types d'écosystèmes : la zone côtière, la zone marécageuse de l'affluent Nyavyamo et la petite île surnommée « akagwa ».

La zone côtière a été sérieusement exploitée. La végétation naturelle a complètement disparu. Des

champs de cultures touchent à certains endroits les rives du lac. Quelques îlots de *Cyperus papyrus*, *Typha domingensis* et *Phragmites mauritianus* sont observables en bordure du lac. La mise en défens à certains endroits de la zone côtière d'une zone tampon de 50 m de largeur a permis le développement d'une végétation artificielle à *Leucaena leucocephala*. Au-delà de cette zone tampon dont la protection n'est pas effective, des champs de bananeraies et de sorgho clairsemés de quelques pieds d'*Albizia versicolor* et *Acacia sieberiana* prennent la relève (Photo 7).



Photo 7 : Panorama de la zone côtière du lac Rwihinda (Mutwenzi)

Le long de la rivière Nyavyamo persiste une végétation à *Cyperus papyrus* qui constitue un réservoir hydrique important pour l'alimentation du lac. Une végétation naturelle rélictuelle a pu se maintenir sur une petite île « akagwa » située au cœur du lac Rwihinda. En plein lac tout près de la zone côtière de cette île, une végétation flottante à *Nymphaea caerulea* et *N. lotus* (Photo 8) annonce la diminution de la profondeur et l'approche des rives. Une végétation d'hélophytes à *Cyperus papyrus*, *Miscanthidium violaceum* ou *Phragmites mauritianus* constitue par endroit une transition vers la terre ferme.

Enfin, des arbres comme *Phoenix reclinata*, *Olea africana*, *Markhamia lutea*, *Bridelia brideliifolia*, *Alchornea cordifolia*, *Acacia polyacantha*, *Maesopsis eminii*, *Erythrococca bongensis* entrelacés par des lianes comme *Cissus rotundifolia*, *Asparagus buchananii*, *Cissus oliveri* (Photo 9) constitue une végétation fermée caractéristique de cette île. Bien que naturelle, cette végétation affiche une empreinte d'activités humaines caractérisées par les pieds de *Synadenium grantii*, *Erythrina abyssinica*, *Dracaena steudneri*, *Vernonia amygdalina*, *Cassia didymobotrya* et *Musa sp.* La présence de *Lantana camara*, espèce envahissante, peut constituer dans un proche avenir un sérieux problème pour sa résilience.



Photo 8 : Végétation flottante à *Nymphaea caerulea* sur la lac Rwihinda



Photo 9 : Groupement à *Phoenix reclinata* sur l'île du lac Rwihinda

III.1.2. Lac Rweru

La bordure du lac Rweru est totalement occupée par des cultures de bananes, de riz, de sorgho, de colocase, de patate douce et de haricot qui atteignent même les eaux du lac. Une végétation de *Cyperus papyrus*, *Phragmites mauritianus*, *Aeschynomene elaphroxylon* (Photos 10 & 11), *Miscanthidium*

violaceum et *Typha domingensis* occupent quelques lopins de terre impropre à l'agriculture. Même la grande île de ce lac « Kuruyoka » a été totalement défrichée et mise en cultures par quelques familles de « Batwa ». Quelques franges côtières ont été également colonisées par la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*).



Photo 10 : Groupement à *Aeschynomene elaphroxylon* en bordure du lac Rweru



Photo 11 : Des nids des oiseaux sur *Aeschynomene elaphroxylon* en bordure du lac Rweru

III.1.3. Lac Kanzigiri

Le lac Kanzigiri est relié au lac Rweru par le marais à *Cyperus papyrus* de Ruduhira (Photo 12). La zone côtière est occupée par des lambeaux de végétation à *Cyperus papyrus* (Photo 13), *Miscanthidium violaceum* (Photo 14) et *Phragmites mauritianus* (Photo 15) constituant ainsi une petite zone tampon de quelques 5 m qui donne aux cultures de sorgho, de

bananeraies et de manioc. La végétation flottante est surtout dominée par *Azolla filiculoides*. A la limite lacustre du marais Ruduhira se trouve une végétation à la manière des mangroves à racines échasses spectaculaires de *Ficus lepreuri* (Photo 16). C'est dans cette formation que l'orchidée *Eulophia horsfallii* (Photo 17) et la fougère *Cyclosorus gongylodes* ont trouvé leurs préférés écologiques.



Photo 12 : Panorama du marais de Ruduhira reliant le lac Kanzigiri au lac Rweru.



Photo 13 : Groupement à *Cyperus papyrus* en bordure du lac Kanzigiri



Photo 14 : Groupement à *Miscanthidium violaceum* en bordure du lac Kanzigiri



Photo 15 : Groupement à *Phragmites mauritianus* en bordure du lac Kanzigiri

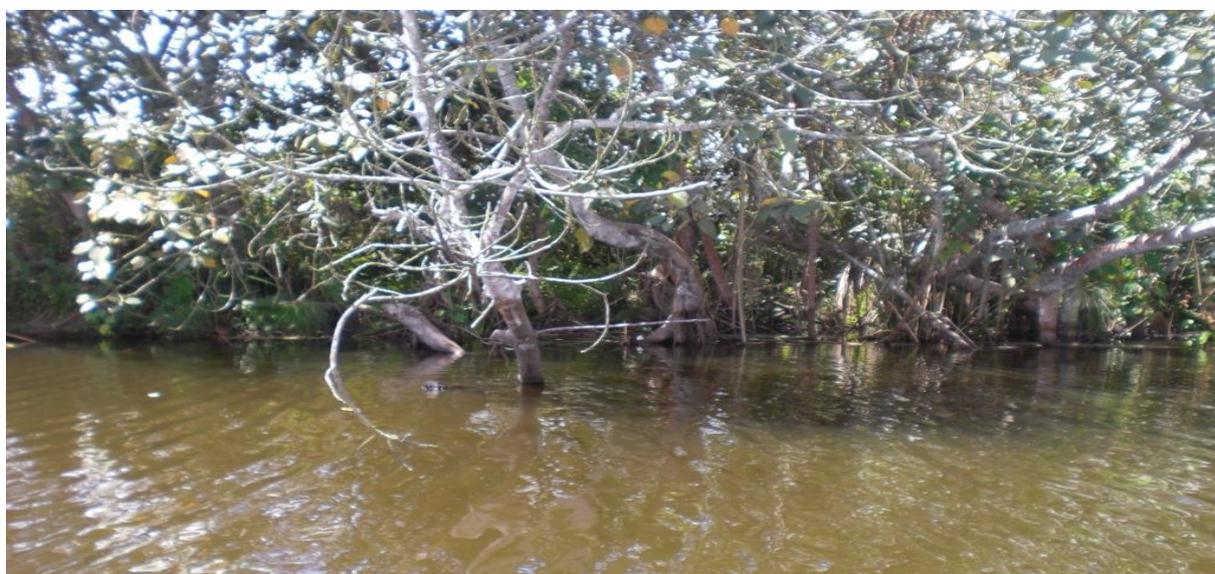


Photo 16 : *Ficus lepriouri* en bordure du lac Kanzigiri



Photo 17 : *Eulophia horsfallii* et *Cyclosorus gongylodes* à l'ombre de la mangrove à *Ficus lepriouri* au bord du lac Kanzigiri

III.1.4. Lac Cohoha

Le lac Cohoha n'a plus de marais en sa bordure. Les champs de cultures touchent la zone littorale sans aucune transition de formation végétale. Les rares marais à *Cyperus papyrus* et *Cyperus latifolius* sont observés dans les zones limitrophes des ses différents bras. L'envasement créé par le labour et les dépôts de terres cultivables dans le lac occasionne par endroit l'établissement d'une formation marécageuse

flottante à *Nymphaea lotus* et *Nymphaea caerulea* avec quelques pieds de *Phragmites mauritanus* (Photo 18) et *Cyperus domingensis* (Photo 19). L'exploitation du sable sur la zone côtière amplifie également ce phénomène. Même l'île de Rutega située au milieu de ce lac, qui devrait normalement porter la végétation naturelle caractéristique de la région, a été complètement défrichée depuis longtemps et mise en cultures de haricot, bananeraies et sorgho (Photo 20).



Photo 18 : Groupement à de *Phragmites mauritanus* au bord du lac Cohoha



Photo 19 : Groupement à *Cyperus domingensis* au bord du lac Cohoha



Photo 20 : L'île de Rutega située au milieu du lac Cohoha totalement mise en cultures

III.2. Indicateurs de la dégradation

Le manque d'une zone tampon portant des formations végétales protectrices des rives a eu pour conséquence l'eutrophisation des lacs du Nord du Burundi. La mise en cultures de façon anarchique des berges a accéléré le phénomène d'érosion. L'exploitation des matériaux de construction sur la zone côtière a également contribué à la dégradation des écosystèmes côtiers par la création des bandes totalement découvertes (Photo 21).

Le développement une végétation d'espèces envahissantes constitue également un indicateur éloquent de cette dégradation. La présence de *Lantana camara* (Photo 22) sur la petite île du lac Rwihinda, l'établissement d'*Eichornea crassipes* sur le lac Rweru, le développement des tapis de *Nymphaea lotus* et *Nymphaea caerulea* (Photo 23) et *Azolla filiculoides* (Photo 24) constituent un danger inquiétant pour l'épanouissement des populations animales en général et ichthyofaunes en particulier de ces lacs.



Photo 21 : Exploitation du sable en bordure du lac Cohoha



Photo 22 : Groupement à *Lantana camara* sur l'île du lac Rwihinda



Photo 23 : Zone d'eutrophisation à *Nymphaea lotus* sur le lac Cohoha



Photo 24 : Végétation flottante à *Azolla filiculoides* sur le lac Kanzigiri

III.3 Espèces à haute valeur restauratrice

Parmi les espèces végétales inventoriées dans les écosystèmes sur les zones côtières des lacs de la région de Bugesera, *Phragmites mauritanus*, *Aeschynomene elaphroxylon*, *Acacia polyacantha*, *Maesopsis eminii*, *Malkhamia lutea*, *Pennisetum purpureum*, *Tripsacum laxum* et *Laecena leucocephala* ont attiré notre attention. Il y a lieu de les regrouper en trois groupes. *Phragmites mauritanum* et *Aeschynomene elaphroxylon* jouent un rôle mécanique de stabilisation des berges et un filtrage des éléments provenant du ruissellement. Elles participent ainsi à l'autoépuration de l'écosystème lacustre en améliorant ses conditions écologiques.

Acacia polyacantha, *Maesopsis eminii* et *Malkhamia lutea* sont des essences autochtones susceptibles de constituer un rideau plus ou moins épais de végétation entre le milieu terrestre et le milieu aquatique. Ce rideau participerait à la régulation thermique de par l'ombrage, au brisage du vent et à la l'amélioration de la qualité de l'habitat. Enfin, *Pennisetum purpureum*, *Tripsacum laxum* et *Laecena leucocephala* sont des plantes agroforestières qui contribuent à atténuation de la vitesse de ruissellement dans les champs de cultures sans préjudice sur les rendements agricoles.

Notons que certaines espèces comme *Aeschynomene elaphroxylon* en plus de fournir l'abri, constituent une zone de source de nourriture et de reproduction pour de nombreuses espèces piscicoles. Les espèces d'*Acacia polyacantha* et *Phragmites mauritanus* sont très appréciés par les oiseaux au cours de la nidation.

IV. Discussion

IV.1 Mise en cultures des berges et biodiversité

La destruction de la végétation riveraine des lacs du Nord a eu comme conséquence la perte énorme de la richesse faunistique et floristique. Certaines espèces sont plus sensibles que d'autres aux changements physico-chimiques d'un habitat (température, acidité, salinité, pollution, etc.). La dégradation de la qualité d'un habitat se traduit généralement par une désertion ou une migration des espèces fauniques sensibles, ou à une succession graduelle des espèces végétales.

Les lacs du Nord du Burundi, jadis extrêmement important comme lieu de passage, de repos et d'hibernation pour les oiseaux migrateurs intra-africains et migrateurs paléarctiques, sont actuellement privés de cette beauté paysagère. La coupe d'arbres a certainement entraîné la diminution de ces derniers. Plus de 20 espèces d'oiseaux migrateurs comme *Dendrocygna viduata*, *Phalacrocorax africanus* (le cormoran africain),

Plectoeris gambiensis (l'oie de Gambie), *Pelecanus onocrotalus* (le Pélican Blanc), *Egretta garzetta* (Aigrette garzette) étaient connues au lac Rwihinda (Nzigidahera & Fofu, 2005, MEEATU, 2009 ; 2013). De plus, même les espèces autochtones n'ont pas été à l'abri. Ces plantes servaient de refuge pour les oiseaux aquatiques qui y trouvaient une nourriture abondante et protection contre les prédateurs en y nidifiant.

D'autre part, les crocodiles qui habitaient le lac dans les années précédentes ont totalement disparus. Nous déplorons la disparition très récente d'*Hippopotamus amphibius*. C'est le même cas pour *Cercopithecus aethiops* qui, très récemment, était très abondant dans ces zones riveraines (Nzigidahera & Fofu, 2005; Nzigidahera et al., 2005 ; MEEATU, 2009 ; 2013)).

Certes, la réduction de la ceinture végétale de *Cyperus papyrus*, *Acacia* sp., *Phragmites mauritanus* et *Aeschynomene elaphroxylon* au bord des lacs du Nord du Burundi a entraîné enfin la destruction des lieux de frayère et la migration de certaines espèces de poissons. En effet, une turbidité excessive de l'eau peut engendrer des colmatages des zones de fraie des poissons. Il s'en suit une diminution des population de poissons constatée au fil des années (Blaginière & Marchand, 2002). La production potentielle des lacs du nord du Burundi estimée entre 1170 à 1557 t/an (Courtoy, 1979) et autour de 700 t/an (Corsi et al., 1986) a fortement diminuée actuellement.

IV.3 Mise en cultures des berges et qualité écologique de l'habitat

Comme les plantes nous renseignent sur la nature de l'écosystème et du substrat sur lequel elles poussent, l'évolution du couvert végétal est un bon indicateur des changements (dégradation, amélioration) des qualités écologiques de l'habitat. La prolifération de la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*), originaire d'Amazonie, dans les différentes zones littorales aura pour conséquence l'eutrophisation des lacs du Nord du Burundi. Or, en plus d'empêcher l'oxygénation de la surface, cette espèce flottante en grappe étouffe également par manque de lumière la couverture algale, maillot inférieur de la chaîne trophique.

Christophe de Medeiros (2006) a trouvé que les changements des propriétés écologiques des lacs liés à la pollution industrielle et humaine, à l'accroissement de la population, à la déforestation, etc. semblent avoir eu comme conséquence l'eutrophisation liée à l'explosion de phytoplancton et la permanence d'une zone hypoxique à plus de 20 mètres de profondeur. Ces conditions écologiques ne sont pas supportables par les espèces pélagiques,

seules les espèces piscicoles des marécages pourront persister dans les lacs du Nord du Burundi.

La composition végétale des berges, le type de sol et la pente sont des facteurs qui ont pour effet d'améliorer ou de diminuer la qualité de l'eau et de l'écosystème aquatique. Une berge dénudée de végétation devient une source de perturbation affectant l'intégrité du milieu aquatique. Les paysages des lacs du Nord du Burundi ont perdu leurs qualités écologiques. La ceinture végétale côtière permettait la régulation thermique de par l'ombrage, le brisage du vent et l'amélioration de la qualité de l'habitat.

Les bandes de végétations riveraines jouent un rôle important sur l'état de santé d'un habitat aquatique. Elles assurent la rétention des sédiments, des nutriments et des contaminants, la stabilisation des berges et la protection contre l'érosion, la régulation de la température (Saint-Jacques & Richard, 1998), la régulation des débits lors de fortes pluies, les apports de litière et de débris organiques ligneux nécessaires à certains organismes et la création d'habitats riverains nécessaires au maintien de la biodiversité (Parkyn, 2004).

IV.4 Implications de l'écologie de la restauration

Les pénuries d'eau et de terres liées à l'augmentation de la pression démographique et de la pauvreté, cumulées à un défaut de plans de gestion dans les zones protégées, laissent craindre une diminution de plus en plus importante des zones humides (diminution des ressources naturelles, réduction des pâturages, etc.) et des avantages qu'elles offrent. Le phénomène est déjà observable dans les paysages des lacs du nord du Burundi. Des efforts visant leur

réhabilitation et leur restauration doivent être privilégiés (MEEATU, 2009 ; 2013).

Le projet doit se focaliser sur la végétalisation des berges avec un double objectif c'est-à-dire rétablir une ripisylve à vocation structurelle mais aussi paysagère. Cette réhabilitation doit viser l'amélioration des potentialités piscicoles des berges, la diversification de la flore locale et la qualité de l'eau.

Les actions à mettre œuvre concernent l'implantation des formations végétales typiques des milieux ripicoles en rive, la diversification des formations végétales en alternant les espaces ouverts et fermés et enfin la diversification des strates et classes d'âges de végétation pour des soucis écologiques et paysagers.

L'utilisation du modèle «Pressions /Etat/Réponses (PER)» permettrait de mettre en évidence de manière simple les liens de causalité entre les activités humaines et leur impact sur l'environnement. En effet, les indicateurs d'état décrivent la qualité de l'environnement, la qualité et la quantité des ressources naturelles soit l'état initial, les indicateurs de pression décrivent les pressions des activités humaines exercées sur l'environnement (prélèvements, pollutions) et enfin, les indicateurs de réponse illustrent les mesures correctrices, les efforts faits pour améliorer l'environnement ou atténuer sa dégradation (actions réglementaires, actions d'amélioration de la connaissance, mesures de gestion). Le tableau 2 propose des actions concrètes suivant le modèle PER.

Tableau 2 : Application du modèle PER dans le cas des lacs du Nord du Burundi

Lac	Pressions	Etats (Indicateurs)	Réponses
Rweru	Eutrophisation Pression anthropique Envahissement	<i>Nymphaea</i> Perte de la biodiversité Champs de cultures (rives) <i>Eichornea crassipes</i>	Agroforesterie Ripisylve Zone tampon de 50 m
Cohoha	Eutrophisation Pression anthropique Exploitation du sable	<i>Nymphaea</i> Perte de la biodiversité Champs de cultures (rives) Gisements de sable (rives)	Agroforesterie Ripisylve Zone tampon de 50 m
Kanzigiri	Eutrophisation Pression anthropique Exploitation du coltan	<i>Azolla</i> Perte de la biodiversité Champs de cultures (rives) Gisements de coltan (rives)	Agroforesterie Ripisylve Zone tampon de 50 m
Rwihinda	Eutrophisation Pression anthropique Envahissement	<i>Nymphaea</i> Perte de la biodiversité Champs de cultures (rives) <i>Lantana camara</i>	Agroforesterie Ripisylve Zone tampon de 50 m

Au cours de cette action restauratrice, les espèces autochtones de la région de Bugesera seront les privilégiées. Il s'agit de *Phragmites mauritanus*, *Aeschynomene elaphroxylon*, *Acacia polyacantha*, *Maesopsis eminii* et *Malkhamia lutea*. Les espèces *Pennisetum purpureum*, *Tripsacum laxum* et *Laecena leucocephala* déjà présentes dans la région en agroforesterie sont également recommandées.

V REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Coopération Universitaire au Développement (CUD) pour avoir soutenu la réalisation de cet article en finançant les travaux de terrain et sa rédaction au cours d'un séjour en Belgique. Une reconnaissance très méritée revient également aux examinateurs de notre manuscrit pour les multiples améliorations et remaniements.

VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Blaginière J. L. & Marchand F., 2002.- Evolution des populations de saumon Atlantique (*Salmo solar*) de l'Oir, petit cours d'eau de Basse-Normandie de 1984 à 2002. Rapport du Comité de Gestion de Cerisel/UMR-ENSA, EQHC, Rennes, 10 p.

Braun-Blanquet J., 1932.- *Plant sociology. The study of plant communities*. Mac Gray Hill, New York, London, 439 p.

Christophe de Medeiros, 2006.- Les biotopes du lac Victoria. Revue aquariophile d'eau douce et d'eau de mer, 14 p.

Corsi F., Dunn I. & Felicioni E., 1986.- Pêche-pisciculture: analyse sectorielle et programme d'intervention. Consultations Sectorielles en Développement Rural, Burundi. Project : FAO-FI-BDI/85/U71, 136 p.

Coulter G. W., 1975.- Les ressources en poisson du lac Tanganyika et situation actuelle de la recherche halieutique. FAO, Rome.

Lebrun J. P & Stork A. L., 1991-2010.- Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale et Tropical African Flowering Plants: Ecology and Distribution, vol. 1, 2, 3, 4, 5 in prep. Conservatoire et Jardin botaniques de la Ville de Genève.

Lebrun J. P. & Stork A. L., 1991-1997.- Enumération des plantes à fleurs d'Afrique tropicale. Conservatoire et Jardin Botanique de la ville de Genève, 4 volumes.

Liben L., 1960.- Carte des sols et de la végétation du Congo belge et du Rwanda-Urundi.7. Bugesera-Mayaga, A .B. et C. Notice explicative de la carte des sols et de la végétation. INEAC, Bruxells, 52 p.

Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme, 2009.- Plan de gestion et d'aménagement du Paysage Aquatique Protégé de Bugesera. Bujumbura, INECN, 79 p.

Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme, 2013.- Plan de gestion et d'aménagement du Paysage Aquatique Protégé de Bugesera. Bujumbura, INECN, 46 p.

Nzigidahera B. & Fofu A., 2005.- Plan de gestion de la Réserve Gérée du lac Rwihinda. INECN, Bujumbura/Burundi, 43 p.

Nzigidahera B., Fofu A. & Misigaro A., 2005.- Etude d'identification : paysage aquatique protégé du Nord du Burundi. INECN, Bujumbura/Burundi, 95 p.

MRAC, 1981.- Atlas géologique du Burundi 1/100.000.

Parkyn S., 2004.- Review of riparian buffer zone effectiveness. MAF Technical Paper No: 2004/05. ISBN No: 0-478-07823-4. ISSN No: 1171-4662, 31 p.

Saint-Jacques N. & Richard Y., 1998.- Développement d'un indice de qualité de la bande riveraine: application à la rivière Chaudière et mise en relation avec l'intégrité biotique du milieu aquatique. In Ministère de l'Environnement et de la Faune (éd.), Le bassin de la rivière Chaudière : l'état de l'écosystème aquatiques-1996. Direction des écosystèmes aquatiques, Québec, envirodoq n° EN980022, 61- 641.

Schmitz A., 1988.- Révision des groupements végétaux décrits du Zaïre, du Rwanda et du Burundi. Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Vol. 17, 315 p.



Contribution of *Terminalia catappa* L. to the survival of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in Bujumbura city, Burundi.

Ndayizeye Liévin¹ & Sibomana Claver²

¹Office Burundais pour la Protection de l'Environnement (OBPE), Direction de l'Environnement et des Changements Climatiques, B.P. 2757 Bujumbura, Burundi

²Center for Research in Natural Science and Environment, Faculty of Sciences, University of Burundi, PO Box 2700 Bujumbura, Burundi

Corresponding author: ndayizeyeliévin@yahoo.com

Reçu: le 03 Juillet 2019

Accepté: le 16 Juillet 2020

Publié: le 20 Août 2020

ABSTRACT

Bactrocera dorsalis (Hendel, 1912) is an invasive species abundant in western Burundi. It is a polyphagous pest species, and is of a specific interest to vegetable and fruit crops of economic importance. However, the development of this fruit fly species is also made possible by non-commercial hosts fruit crops. In order to show the contribution of *Terminalia catappa* to the survival of *B. dorsalis*, a study based on fruit flies incubation was done in Bujumbura city from June to September 2017. *B. dorsalis* was collected from incubated fruits infested by flies. Fruits were collected in neighbourhoods according to the population and fruit trees density. Results show that neighbourhoods with low population density and high number of fruit trees have higher infestation rates than those with high population density and few number of fruit trees. This study showed that *T. catappa* contributes significantly to the survival of populations of *B. dorsalis* in Bujumbura city as the latter uses its fruits as hosts especially in the dry season. *T. catappa* can be considered as an alternative host plant for *B. dorsalis* used in the absence of its preferred host plants.

Key words: *Bactrocera dorsalis*, *Ceratitis cosyra*, fruit flies, host plant

RESUME

Bactrocera dorsalis (Hendel, 1912) est une espèce envahissante abondante à l'Ouest du Burundi. C'est un ravageur polyphage d'intérêt particulier pour les cultures végétales et fruitières d'importance économique. Le développement de cette espèce de mouche des fruits est rendu possible aussi par des plantes hôtes sauvages. Afin de montrer la contribution de *Terminalia catappa* Linn à la survie de *B. dorsalis*, une étude basée sur l'incubation des fruits a été réalisée dans la ville de Bujumbura de Juin à Septembre 2017. Les fruits ont été collectés dans les quartiers en tenant compte de la densité de la population et des arbres fruitiers. Les quartiers à faible densité de la population et un grand nombre d'arbres fruitiers ont un niveau d'infestation élevé par rapport aux quartiers avec une densité de la population élevée et peu d'arbres fruitiers. Cette étude a montré que *T. catappa* contribue significativement à la survie des populations de *B. dorsalis* dans la ville de Bujumbura étant donné que cette dernière utilise ses fruits spécialement pendant la saison sèche. *T. catappa* peut être considérée comme une plante hôte alternative pour *B. dorsalis* utilisée en l'absence de ses plantes hôtes préférées.

Mots clés : *Bactrocera dorsalis*, *Ceratitis cosyra*, mouches des fruits, plante hôte

I. INTRODUCTION

Fruit flies are among the most damaging pests of fruits and vegetables in the world (White and Elson-Harris, 1992; IAEA, 2003; Ekesi and Billah, 2007). Among them, the oriental fruit fly *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Diptera: Tephritidae) is a polyphagous pest species first identified in Africa in 2003 (Lux et al., 2003). Nevertheless, this species shows preference for ripe mango (*Mangifera indica*) (Rattanapun et al., 2009). It is an invasive species considered as fruit pest attacking a wide range of host plants causing huge damage to both local and export production (Vayssières et al., 2005; Ekesi et al., 2006; Mwatawala et al., 2006; Goergen et al., 2011; Rwomushana et al., 2008a). In Burundi, *B. dorsalis* was first detected in Kigwena, south-western Burundi in 2009 and is abundant in the western part of Burundi in the Imbo region along the shore of Lake Tanganyika and Rusizi river (Ndayizeye et al., 2017).

The western Burundi is a home to a wide variety of edible fruit crops such as mango (*Mangifera indica* L.), avocado (*Persea americana* L.), orange (*Citrus sinensis* L.), tangerine (*Citrus reticulata* L.), and guava (*Psidium guajava* L.) which are potential hosts of *B. dorsalis* (Ndayizeye, unpublished data). It makes use of soft fleshy parts of the fruit and vegetable becoming a pest of economic importance. The short generation cycle of this species allows multiple generations within a fruiting season while the absence of seasonal fruits hosts within a region makes adult *B. dorsalis* make use of alternative host plants such as *Terminalia catappa* L. whose fruits are available during the whole dry season.

Terminalia catappa, frequently referred to as “tropical almond”, belongs to the family *Combretaceae* and originates from Southern India to coastal South-East Asia (Smith, 1971). These trees are widely cultivated in tropical and subtropical coastal areas and used by local communities for a number of household uses. The tree is planted for shade and ornamental purposes in urban environments (Chen et al. 2000; Hayward, 1990; Kinoshita et al., 2007). *Terminalia catappa* is generally known as host of some fruit fly species within the *Bactrocera* genus (Tsuruta et al., 1997; Clarke et al., 2005).

For this plant, flowering and fruiting occur throughout the year, but ripe fruits are available from May to October, a period spanning the dry season. It produces brown or violet-brown drupes which remain on the tree for a long time. In spite of their attractive colour and smell, they are not actually

consumed by local population except some children from poor families. During rainy season (September to May), some trees can be seen with sparse amounts of ripe fruits. In Burundi, the dry season is considered as an off-season period for most of fruit crops. Due to its preference to warm climate regions, *Terminalia catappa* is largely distributed in the western Burundi especially in the city of Bujumbura where it is often planted along avenues, in public and home gardens for shade and ornamental purpose. In addition, the flesh of the fruit is often fibrous and not tasty in spite of the pleasant smell (Heinsleigh, 1988) and like in other countries, fruits are not commonly consumed by Burundian population.

The main fruit trees that are used by *B. dorsalis* as hosts do not bear fruit during the dry season. The survival of *B. dorsalis* would be compromised during this season if there are no other plants that this fruit fly species would use as a host. Given its fruition that occurs during the dry season on the trees found in the city of Bujumbura, *T. catappa* is a potential host that would help *B. dorsalis* to survive in this season. Most of the cases, ripe fruits are often observed remaining on the tree or decomposing on the ground. However, few studies have evaluated to which extent *T. catappa* contributes to the survival of *B. dorsalis* especially in urban areas. The present study investigates the contribution of *T. catappa* to the survival of *B. dorsalis* in Bujumbura city during the dry season.

II. MATERIALS AND METHODS

II.1 Study sites

This study's sample collection was conducted from June to September 2017, a period spanning the dry and fruiting season for *Terminalia catappa*, in three communes of Bujumbura city (Muha, Mukaza and Ntahangwa). *T. catappa* fruits were collected at three sites in each neighbourhood taking into account the presence of other trees, potential fruit flies hosts especially mango trees (table 1). The sites altitude ranges from 783 to 884m with a warm climate and temperatures ranging from 23°C to 28°C. The location was determined using a Garmin Global Positioning System (GPS) device (fig. 1).

Table 1. Sampling sites location and present fruit trees

Communes	Sites	Coordinates	Altitude (masl)	Fruit trees
Muha	Kibenga	3°25'13" S 29°21'4" E	793	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.) and lemon tree (<i>Citrus lemon tree</i> L.), papaya tree (<i>Carica papaya</i> L.), coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.)
	Kinindo	3°24'41" S 29°21'22" E	796	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), papaya tree (<i>Carica papaya</i> L.)
	Kanyosha	3°25'21" S 29°21'23" E	806	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i>), lemon tree (<i>Citrus lemon</i> L.), papaya tree (<i>Carica papaya</i> L.), coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.)
Mukaza	Kiriri	3°23'24" S 29°22'39" E	884	avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), citronier (<i>Citrus lemon</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.)
	Mutanga	3°22'40" S 29°23'4" E	857	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), lemon tree (<i>Citrus lemon</i> L.), guava tree (<i>Psidium guajava</i> L.), pomegranate (<i>Punica granatum</i> L.)
	Rohero	3°23'10" S 29°22'23" E	822	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), citronier (<i>Citrus lemon</i> L.), guava tree (<i>Psidium guajava</i> L.) and coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.)
Ntakangwa	Ngagara	3°20'51" S 29°21'35" E	794	avocado tree (<i>Persea americana</i> L.), mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), lemon tree (<i>Citrus lemon tree</i> L.), papaya tree (<i>Carica papaya</i> L.) and coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.)
	Quartier Industriel	3°21'26" S 29°20'37" E	783	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.), avocado tree (<i>Persea americana</i> L.) and lemon tree (<i>Citrus lemon</i> L.)
	Mutakura	3°20'31" S 29°22'6" E	811	mango tree (<i>Mangifera indica</i> L.), avocado tree tree (<i>Persea americana</i> L.), orange tree (<i>Citrus sinensis</i> L.), lemon tree (<i>Citrus lemon tree</i> L.), papaya tree (<i>Carica papaya</i> L.), coconut tree (<i>Cocos nucifera</i> L.) and pomegranate (<i>Punica granatum</i> L.)

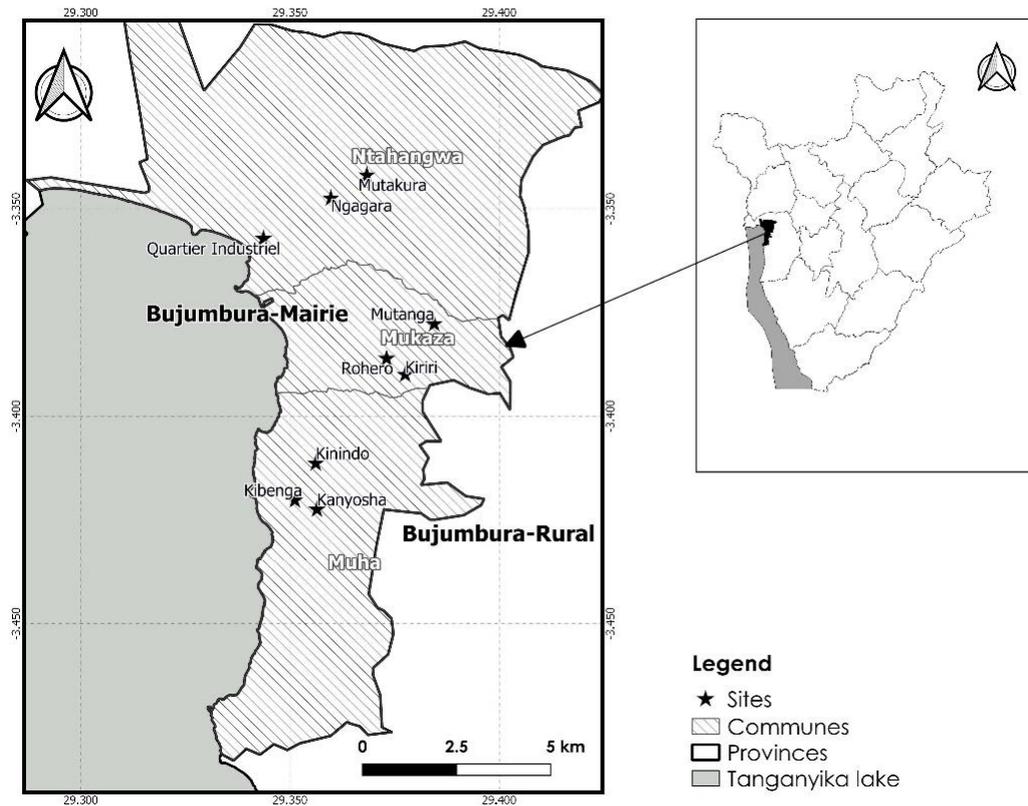


Figure 1: Map of Bujumbura city showing the study sites

II.2 Fruit collection and incubation process

Ripe fruits (of brown or violet brown colour) were harvested or collected on the ground and stored immediately in black bags. The number of collected fruits at each sampling day depended on available ripe fruits, but overall 40 fruits were collected per site at the end of the sampling period. After sampling, fruits were put in boxes to avoid shocks during transportation. The samples were taken to incubation facility of the OBPE (Office Burundais pour la Protection de l'Environnement) and were processed according to the protocol of Ekesi and Billah (2007). In the incubation facility, fruits were counted, washed and weighed. Fruit samples were then stored in ventilated rectangular plastic boxes containing sand of 21.5 cm x 15 cm x 16.5 cm or in boxes with circular base of 13 cm x 8 cm. During incubation, mold that appeared on the fruits was removed with a small wooden spatula to facilitate the larvae release and emergence of flies. Fruit sample boxes were monitored on a daily basis for the emergence of adults. Daily monitoring and room cleaning were performed to prevent the predation from ants. The incubated fruits were discarded after their complete decomposition.

II.3 Data analysis

II.3.1 Infestation rate

The infestation rate is obtained using the formula from De Souza et al. (2016) and Vayssières et al. (2009) where the Infestation Rate (IR) is the ratio between the total number of pupae per sample and the weight of the incubated fruits. Since the study did not take pupae into account due to the lack of suitable devices to keep them in normal development conditions (temperature and pressure), the IR was obtained using the ratio between the number of flies that emerged and the weight of the incubated fruits for each site .

IR=Number of emerged flies/weight of the incubated fruits.

II.3.2 Index of Bray-Curtis

The Bray-Curtis Similarity Index was used to make a Hierarchical Habitat Grouping (UPGMA).

$$\text{Index of Bray-Curtis} : BCD_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n |X_{ik} - X_{jk}|}{\sum_{k=1}^n (X_{ik} + X_{jk})}$$

Where X_{ik} : species abundance k for line i , X_{jk} : species abundance k for line j , n : total number of variables (species) in the matrix.

This index is the quantitative equivalent of the similarity index of Sorensen. The hierarchical grouping was done by applying the "UPGMA (Unweighted Peer Group Method with Arithmetic Mean)" using Cluster Analysis option of the MVSP 3.2 (Multi Variate Statistical Package) (Kovach, 1997) software to generate dendrogram. This method hierarchically groups the different habitats according to their similarity.

III. RESULTS

III.1 Abundance

A total of 360 fruits of *Terminalia catappa* L. were collected and 2681 individuals of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) emerged from them. As per site, 633 individuals that is 23.61% emerged from the fruits collected at Q. Industriel. In Kinindo and Kiriri, we got respectively 576 and 558 individuals that is 21.48% and 20.81% respectively of the emerged individuals. Fruits collected at Rohero and Mutakura sites provided 297 and 247 flies, meaning 11.08% and 9.21% of all individuals (Table 2). Low numbers of individuals emerged from fruits collected in Mutanga and Kanyosha with 180 and 110 individuals or 6.71% and 4.10% respectively. The lowest numbers were observed in Ngagara and Kibenga sites with 57 and 23 individuals, that is 2.13% and 0.86% of the emerged individuals (fig. 2).

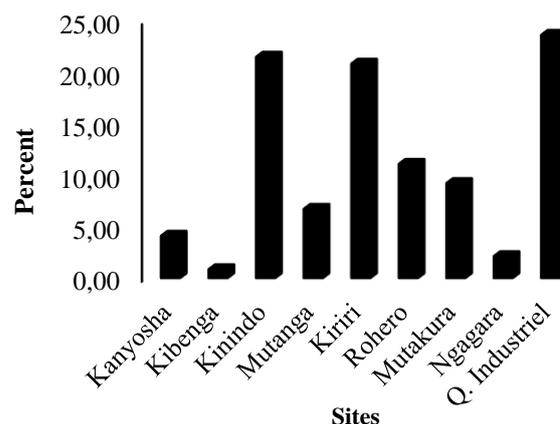


Figure 2: Relative abundance of captured flies per site

III.2 Infestation rate

Taking into account the emergence of *B. dorsalis* (2681 individuals) in relation to weight (16.65kg), the general infestation rate is 161.02 flies per kg. The highest infestation rate was recorded at Q. Industriel with 301.43 flies per kg followed by Kiriri, Kinindo and Mutanga sites with respectively 279.00 flies per kg, 274.29 flies per kg and 225.00 flies per kg. For Rohero and Mutakura sites the infestation rates were 165.00 and 141.14 flies per kg respectively. The lowest infestation rates were observed at Kanyosha, Ngagara and Kibenga sites with 57.89 flies per kg, 20.36 flies per kg and 16.43 flies per kg (Table 2).

Table 2 : Results on collected fruits and infesting flies

Communes	Sites	Collected fruits	Fruits weight (Kg)	Emerged flies	%	Infestation rate (flies/kg)
Muha	Kanyosha	40	1.9	110	4.10	57.89
	Kibenga	40	1.4	23	0.86	16.43
	Kinindo	40	2.1	576	21.48	274.29
	<i>Subtotal</i>	<i>120</i>	<i>5.4</i>	<i>709</i>	<i>26.45</i>	<i>131.30</i>
Mukaza	Mutanga	40	0.8	180	6.71	225.00
	Kiriri	40	2.0	558	20.81	279.00
	Rohero	40	1.8	297	11.08	165.00
	<i>Subtotal</i>	<i>120</i>	<i>4.6</i>	<i>1035</i>	<i>38.60</i>	<i>225.00</i>
Ntahangwa	Mutakura	40	1.75	247	9.21	141.14
	Ngagara	40	2.8	57	2.13	20.36
	Q. Industriel	40	2.1	633	23.61	301.43
	<i>Subtotal</i>	<i>120</i>	<i>6.65</i>	<i>937</i>	<i>34.95</i>	<i>140.90</i>
Total		360	16.65	2681	100.00	161.02

III.3 Index of Bray-Curtis

The dendrogram shows clear clustering with the first group composed of Kinindo, Kiriri, Q. Industriel and Mutanga sites (fig. 3). The highest rates of infestation have been observed at these sites. The second group is composed of Mutakura and Rohero sites making the group which is closer to the first one. These sites have average infestation rates. On the other hand, Ngagara, Kibenga and Kanyosha sites form the last group with strong similarity observed between Ngagara and Kibenga. The last two sites have the lowest infestation rates.

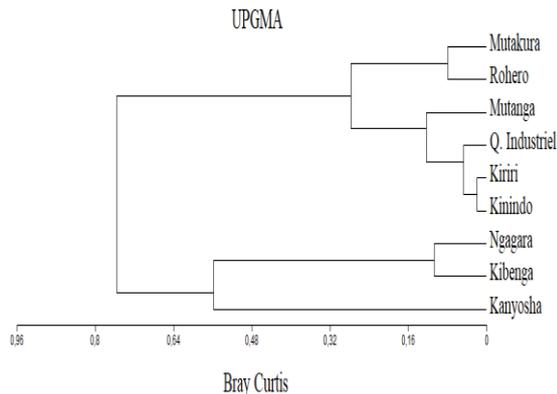


Figure 3: Dendrogram

IV. DISCUSSION

In this study, two species of fruit flies, *Bactrocera dorsalis* and *Ceratitis cosyra*, emerged from the collected fruits of *T. catappa*. These species have been found infesting the same host species fruits in studies conducted in other regions. José et al. (2013) found *C. cosyra* infesting *T. catappa* in Cabo Delgado, northern Mozambique. In Thailand, Somta et al. (2010) found that *Terminalia catappa* was used as a host by four species of *Bactrocera* including *B. dorsalis*, *B. correcta*, *B. latifrons*, and *B. cucurbitae* with a significant dominance of *B. dorsalis* with 94.9% of the catches.

Although the tropical almond or *T. catappa* is infested by many species of fruit flies (Diptera: Tephritidae) (Rwomushana et al., 2008a), there seem to be a dominant emergence of *B. dorsalis*. This would be due to the fact that tropical almond is among the preferred wild hosts of *B. dorsalis*. In fact, in their study in Kenya, Rwomushana et al. (2008) found that *T. catappa* was the most heavily infested among the wild host plants by *B. dorsalis*. In addition, Siderhurst and Jang (2006) reported that ripe fruits of tropical almond attract females of *B. dorsalis*. The presence of these fruits on the trees during the dry season provides oviposition sites for females and maintains high population densities of *B. dorsalis*. These wild plants ensure basic conditions for breeding such as spawning and

nutrient source for larvae, for *B. dorsalis* during the off-season period when host plants do not bear fruits.

The number of emerged fruit flies individuals observed differed in different sites. This could be explained by the ability of *B. dorsalis* to use many alternative host plants. In fact, Mwatawala et al. (2009) found that *B. dorsalis* was predominant but was using a much larger range of available alternative host plants in their study area. Another factor increasing its abundance is that *B. dorsalis* displaces other fruit flies species. Indeed, *B. dorsalis* has displaced *C. cosyra* on mango by its aggressive behaviour between adult flies and competition on food resources in studies conducted in Kenya (Rwomushana et al., 2009; Ekesi et al., 2009). A similar behaviour was observed in the Hawaiian Islands, in 1945, where *B. dorsalis* has largely displaced *Ceratitis capitata* in the coastal areas where it was previously established (Duyck et al., 2004). Also on the Thailand Peninsula, *B. dorsalis* has been observed displacing other species of *Bactrocera* genus (Danjuma, 2018). It has been said that *Bactrocera* spp. could use resources better than pre-established species, probably by denying them access to food or target sites (Duyck et al., 2004). In Kenya, Ekesi et al. (2006, 2009) found that *C. cosyra* was abundant on the mango before the arrival of *B. dorsalis* while Salum et al. (2013), reported that *B. dorsalis* reproduces more quickly than *C. cosyra*. Thus, the arrival of *B. dorsalis* in a given area leads to a decrease in populations of pre-established species. In fact, we have observed some individuals of *C. cosyra* during the emerged flies' collection; showing that this populations of this species would have been dominated by *B. dorsalis*.

Despite the variation between sites, the infestation rate showed that fruits had strong infestation from *B. dorsalis*. Other studies have found similar infestation rates ranging from 123.1 to 652.8 individuals per kg of fruits (Rwomushana et al. 2008a, Thomson and Evans, 2006 and José et al. 2013). This variation would be due to the availability and abundance of host plants in different sites as these two factors have direct influence on the abundance of fruit flies populations. For example, Mwatawala et al. (2006) in their study conducted in Morogoro, found that the abundance of *B. dorsalis* was correlated with the fruiting season of mango and guava. In addition, the abundance of a species of fruit flies in a given locality is linked to the presence of preferred host plants (Hafsi et al. 2016). Thus, the presence of mango trees in a site contribute to the increase in populations of *B. dorsalis*. According to Rattanapun et al. (2009), Ekesi and Billah (2007) and Mwatawala et al. (2006), mango is the preferred host plant for *Bactrocera dorsalis* and Chen & Ye (2007) indicate that the availability of host plants is one of

the factors influencing the distribution and density of the population of Tephritidae in general.

Q. Industrial, Kiriri, Kinindo and Mutanga sites which have the highest infestation rates show the strongest similarity. These sites are located in residential neighbourhoods with low population and house density. In these areas, there are large plots and few houses with a high density of planted fruit trees including mango. In these neighbourhoods, a high number of ripe fruits are not harvested and therefore fall on the ground. Thus, these fruits ensure reproduction and development of *B. dorsalis*. This could explain the high density of fruit flies that emerged from the fruits collected in these neighbourhoods. Secondly, there is similarity between Mutakura and Rohero sites. Rohero is near downtown Bujumbura and has a low density of houses with planted trees but the area is mostly used for offices and business with a large number of trees planted along roadsides. Like in Mutakura which is a high populated neighbourhood with less fruit trees, fruits especially mangoes are harvested most of the time before maturity by children or some house workers to be sold or for consumption. Thus, the populations of *B. dorsalis* do not have the opportunity to multiply at this site. On the other hand, Kanyosha, Ngagara and Kibenga sites are among the most populated neighbourhoods in Bujumbura city with few fruit trees. Kibenga site is located in a new neighbourhood with a dominance of ornamental plants while Ngagara and Kanyosha are old neighbourhoods.

This study shows that *T. catappa* Linn contributes significantly to the survival of populations of *B. dorsalis* in Bujumbura city as the latter uses its fruits as hosts especially in the dry season. In addition, the presence of preferred hosts in an area increases the abundance of the fruit flies *B. dorsalis* in tropical almond fruits. Thus, *T. catappa* can be considered as an alternative host plant for *B. dorsalis* used in the absence of its preferred host plants. Programmes aiming at eradicating fruit flies as pests should take *T. catappa* into account as a potential host significantly contributing to the survival and development of *B. dorsalis*.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank Dr. Charmaine Dawn Theron, Department of Zoology and Entomology, University of Pretoria, South Africa and Dr. Marc De Meyer, Department of Biology, Royal Museum for Central Africa, for their comments on the early draft manuscript of this paper.

VI. REFERENCES

- Chen, P.S., Li, J.H., Liu, T.Y. & Lin, T.C. (2000) Folk medicine from *Terminalia catappa* and its major tannin component, punicalagin, are effective against bleomycin-induced genotoxicity in Chinese hamster ovary cells. *Cancer Lett* 152:115–122.
- Clarke, A.R., Armstrong, K.F., Carmichael, A.E., Milne, J.R., Raghu, S., Roderick, G.K., & Yeates, D.K. (2005). Invasive phytophagous pests arising through a recent tropical evolutionary radiation: the *Bactrocera dorsalis* complex of fruit flies. *Annu. Rev. Entomol.* 50:293-319.
- Copeland, R.S., Wharton, R.A., Luke, Q. & De Meyer, D. (2002) Indigenous Hosts of *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) in Kenya, *Ann. Entomol. Soc. Am.* 95 (6): 672-694.
- Copeland, R.S., Wharton, R.A., Luke, Q., De Meyer, M., Lux, S., Zenz, N., Machera, P. & Okumu, M. (2006) Geographic Distribution, Host Fruit, and Parasitoids of African Fruit Fly Pests *Ceratitidis anonae*, *Ceratitidis cosyra*, *Ceratitidis fasciventris*, and *Ceratitidis rosa* (Diptera: Tephritidae) in Kenya, *Ann. Entomol. Soc. Am.* 99(2): 261-278.
- Cornelius, M.L., Nergel, L., Duan, J.J. & Messing, R.H. (2000) Responses of Female Oriental Fruit Flies (Diptera: Tephritidae) to Protein and Host Fruits Odors in Field Cage and Open Field Tests, *Environmental Entomology* 29(1):14-19. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-29.1.14>
- Danjuma, S. (2018) Population Dynamics and Displacement Capacity of Nine *Bactrocera* spp. (Diptera: Tephritidae) in Fruit Orchards of the Peninsular Thailand, *Kaduna Journal of Agriculture and Natural Resources* Vol. 3(1), pp 63-83.
- De Meyer, M., Copeland, R.S., Lux, S.A., Mansell, M., Quilici, S., Wharton, R., White, IM. & Zenz, N.J. (2002) Annotated check list of host plants for afro-tropical fruit flies (Diptera: Tephritidae) of the genus *Ceratitidis* Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique, Documentation Zoologiques, Vol. 27.
- De Souza, E.O., Anato, F.M., Bokonon-Ganta, AH., Hintenou, MV. (2016) Infestation naturelle de *Murraya paniculata* L. Jack, (Rutaceae) par les mouches Tephritidae nuisibles aux fruits dans la commune de Porto-Novo (Sud-Est du Bénin), *Journal of Applied Biosciences* 105 :10111-10119.
- Duyck, P-F., David, P. & Quilici, S. (2004) A review of relationships between interspecific competition and invasions in fruit flies (Diptera: Tephritidae), *Ecological Entomology* 29, 511–520.

- Edwin-Wosu, N.L., Omara-Achong, T., Nyannanyo, B.L. (2013) Ecogeographical Amplitude and Habitat of Two Species of the Genus *Terminalia* (Combretaceae) In the Central Niger Delta Areas in Rivers State. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* Vol 17(1):75-80
- Ekese, S., Billah, M.K. (2007) A Field Guide to the Management of Economically Important Tephritid Fruit Flies in Africa. ICIPE Science, Nairobi, Kenya.
- Ekese, S., Billah, M.K., Nderitu, P.W., Lux, S.A. & Rwomushana, I. (2009) Evidence for Competitive Displacement of *Ceratitis cosyra* by the Invasive Fruit Fly *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) on Mango and Mechanisms Contributing to the Displacement *J. Econ. Entomol.* 102(3): 981-991
- Ekese, S., Nderitu, P.W. & Rwomushana, I. (2006) Field infestation, life history and demographic parameters of the fruit fly, *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) in Africa. *Bull. Entomol. Res.* 96, 279–386.
- Fernandes-Da-Silva, P.G. & Zucoloto, F.S. (1993) The influence of host nutritive value on the performance and food selection in *Ceratitis capitata* (Diptera, Tephritidae). *Journal of Insect Physiology*, 39, 883-887.
- Goergen, G., Vayssières, J-F., Gnanvossou, D. & Tindo, M. (2011) *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae), a New Invasive Fruit Fly Pest for the Afrotropical Region: Host Plant Range and Distribution in West and Central Africa, *Environmental Entomology*, 40(4):844-854. DOI: 10.1603/EN11017
- Hafsi, A., Facon, B., Ravigné, V., Chiroleu, F., Quilici, S., Chermiti, B. & Duyck, P-F. (2016) Host plant range of a fruit fly community (Diptera: Tephritidae): does fruit composition influence larval performance? *BMC Ecol.* 16(1):1-12, DOI 10.1186/s12898-016-0094-8
- Hayward, D.F. (1990) The phenology and economic potential of *Terminalia catappa* L. in South Central Ghana. *Vegetatio* 90:125–131.
- Heinsleigh, TE. & Holaway, BK. (1988). Agroforestry species for the Philippines. Metro Manila Philippines: US Peace Corps, AJA Printers.
- IAEA (2003) : Trapping guidelines ofr area-wide fruit fly programmes, Vienna, Austria, 47pp.
- José, L., Cugala, D. & Santos, L. (2013) Assessment of invasive fruit fly fruit infestation and damage in Cabo Delgado Province, Northern Mozambique. *African Crop Science Journal*, Vol. 21, No. 1, pp. 21 - 28 ISSN 1021-9730/2013
- Kinoshita, S., Inoue, Y., Nakama, S., Ichiba, T. & Aniya, Y. (2007) Antioxidant and hepatoprotective actions of medicinal herb *Terminalia catappa* L. from Okinawa Island and its tannin corilagin. *Phytomedicine* 14:755–762
- Kovach, WL. (1997) MSVP-Multi-Variate Statistical Package data analysis. Kovach Computing Services; 85 Nant-y-Felin, Pentraeth, Anglesey.
- Lux, S.A., Copeland, R.S., White, I.M., Manrakhan, A. & Billah, M.K. (2003) A new invasive fruit fly species from the *Bactrocera dorsalis* (Hendel) group detected in East Africa. *Insect Science and Its Application* 23, 355–360.
- Morton, J.F. (1985) Indian almond (*Terminalia catappa*), salt-tolerant, useful, tropical tree with 'nut' worthy of improvement. *Economic Botany*, 39(2): 101-112.
- Mwatawala, M.W, De Meyer, M., Makundi, R.H, Maerere, A.P. (2009) Host range and distribution of fruit-infesting pestiferous fruit flies (Diptera, Tephritidae) in selected areas of Central Tanzania. *Bull. Entomol. Res.* 99, 629–641.
- Mwatawala, M.W., De Meyer, M., Makundi, R.H. & Maerere, AP. (2006) Seasonality and host utilization of the invasive fruit fly, *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) in Central Tanzania. *J. Appl. Entomol.* 130, 530–530.
- Ndayizeye, L., Nzigidahera, B. & Theron, C.D. (2017). Effect of parapheromones on the capture of fruit flies (Diptera, Tephritidae) in Burundi. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, 7:413-425. doi: 10.17265/2161-6256/2017.06.007.
- Prokopy, R.J & Roitberg, B.D. (1984) Foraging behavior of true fruit flies [Tephritidae]. *American Scientist*, 72, 41-49.
- Rattanapun, W., Amornsak, W. & Clarke, A.R. (2009) *Bactrocera dorsalis* preference for and performance on two mango varieties at three stages of ripeness, *Entomologia Experimentalis et Applicata* 131 (3), 243-253.
- Rwomushana, I., Ekese, S., Gordon, I. & Ogol, C.K.P.O. (2008) Host Plants and Host Plant Preference Studies for *Bactrocera invadens* (Diptera: Tephritidae) in Kenya, a New Invasive Fruit Fly Species in Africa, *Ann. Entomol. Soc. Am.* 101(2): 331-340.

- Rwomushana, I., Ekesi, S., Ogot, C.K.P.O. & Gordon, I. (2009) Mechanisms contributing to the competitive success of the invasive fruit fly *Bactrocera invadens* over the indigenous mango fruit fly, *Ceratitis cosyra*: the role of temperature and resource pre-emption, *Entomologia Experimentalis et Applicata* 133: 27–37.
- Salum, J.K., Mwatawala, M.W., Kusolwa, P.M. & De Meyer, M. (2013) Demographic parameters of the two main fruit fly (Diptera: Tephritidae) species attacking mango in Central Tanzania, *J. Appl. Entomol.* 1_8doi: 10.1111/jen.12044
- Shelly, T.E., Edu, J. & Pahio, E. (2007) Condition-dependent mating success in male fruit flies: ingestion of a pheromone precursor compensates for a low-quality diet. *J. Insect Behav.* 20, 347–365.
- Siderhurst, M.S. & Jang, E.B., (2006) Female-biased attraction of oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel), to a blend of host fruit volatiles from *Terminalia catappa* L. *J. Chem. Ecol.* 32, 2513–2524.
- Smith, AC.(1971) Studies of pacific island plants, XXIV. The genus *Terminalia* (Combretaceae) in Fiji, Samoa, and Tonga. *Brittonia* 23:394–412.
- Somta, C., Winotai, A. & Ooi, P.A.C. (2010) Fruit flies reared from *Terminalia catappa* in Thailand, *Journal of Asia-Pacific Entomology* 13: 27–30.
- Streets, R.J. (1962) Exotic forest trees in the British Commonwealth. Oxford, UK: Clarendon Press.
- Thomson, L.A.J. & Evans, B. (2006) *Terminalia catappa* (tropical almond). Species profiles for Pacific Island Agroforestry, Permanent Agriculture Resources (PAR), Holualoa, HI.
- Tsuruta, K., White, I.M., Bandara, H.M.J., Rajapakse, H., Sundaraperuma, S.A.H., Kahawatta S.B.M.U.C. & Rajapakse, G.B.J.P. (1997). A preliminary notes on the host plants of fruit flies of the tribe Dacini (Diptera: Tephritidae) in Sri Lanka. *Esakia* 37: 149-160.
- Vayssières, J.-F., Sinzogan, A., Adandonon, A., 2009 c. Gamme de plantes-hôtes cultivées et sauvages pour les principales espèces de mouches des fruits au Bénin. Fiche Technique 8. CIRAD, UPR production Fruitière, Montpellier, France; IITA Cotonou Bénin, 4 p.
- Vayssières, JF. Goergen, G., Lokossou, O., Dossa, P. & Akponon, C. (2005) A new *Bactrocera* species in Benin among mango fruit fly (Diptera: Tephritidae) species. *Fruits* 60, 371–377.



Pollution en ville de Bujumbura: ampleur, impacts préjudiciables et pistes de remédiation

^{1,2}Bigumandondera Patrice, ^{1,2}Ndikuryayo Ferdinand, ^{1,2}Nineza Claire

¹Département de Biologie-Chimie, Institut de Pédagogie Appliquée, Université du Burundi, BP 5223, Bujumbura

²Centre Universitaire de Recherche et de Pédagogie Appliquées aux Sciences

Auteur correspondant: Bigumandondera Patrice, E-mail: patrice.bigumandondera@ub.edu.bi

Reçu: le 24 Septembre 2020

Accepté: le 19 Février 2021

Publié: le 12 Mars 2021

RESUME :

Mots-clés : Déchets, émissions gazeuses, rivières, collecteurs, sédiments, charge polluante, lac Tanganyika, Burundi

Les milieux urbains à grande concentration humaine sont souvent exposés aux phénomènes de pollution. La ville de Bujumbura, une agglomération érigée au bord du lac Tanganyika, abrite diverses activités d'origine domestique, artisanale et industrielle. Ces activités génèrent des quantités importantes des déchets. Cette étude vise, au travers d'une synthèse bibliographique, à dégager l'ampleur de la pollution qui affecte la ville de Bujumbura, les impacts préjudiciables et proposer quelques pistes de remédiation. Sur base des valeurs de DCO, DBO₅, azote, phosphore et des métaux lourds, les études consultées ont révélé que les collecteurs et rivières, traversant cette ville, sont pollués, et cette pollution affecte par conséquent la biodiversité du lac Tanganyika. Cette étude a aussi montré que les déchets solides sont simplement déposés à la décharge non contrôlée avant d'être brûlés à ciel ouvert, occasionnant ainsi une pollution de l'air. En plus, l'usage à grande échelle du charbon de bois dans des braseros traditionnels lors de la cuisson des aliments a été identifié comme source de pollution provenant du secteur résidentiel. Des mesures telles que l'identification et la caractérisation des sources de pollution des rivières/collecteurs, le tri et la collecte séparée des déchets solides suivi de traitement spécifique de ces déchets ainsi que le recours aux énergies vertes et l'usage des foyers améliorés pour la cuisson des aliments pourraient résoudre ces phénomènes de pollution affectant la ville de Bujumbura.

ABSTRACT

Urban environments with a high human density are often subjected to pollution. Erected on the shores of Lake Tanganyika, Bujumbura city is an agglomeration area where various domestic, artisanal, and industrial activities take place. These activities generate large quantities of waste. Through a literature synthesis, this study aims at assessing the extent to which pollution has affected the city, its detrimental impacts, and propose some avenues for remediation. Based on the values of COD, BOD₅, nitrogen, phosphorus, and heavy metals, the consulted studies revealed that the collectors and rivers crossing the city are polluted, and hence may affect the biodiversity of the Lake Tanganyika. Also, this study shows that solid wastes are simply deposited at the uncontrolled landfill before being burned in the open air, therefore causing air pollution. Furthermore, pollution from residential areas has been noted due to the large-scale use of charcoal in traditional braziers when cooking food. Measures such as the identification and characterization of the sources of pollution in rivers or collectors, the sorting and type-based collection of solid wastes followed by specific treatment as well as the use of green energies and improved stoves for cooking food could solve these pollution phenomena affecting the city of Bujumbura.

Keywords: Wastes, gas emissions, rivers, collectors, sediments, pollutant load, Lake Tanganyika, Burundi

1. INTRODUCTION

Selon le Code de l'Environnement de la République du Burundi (2000), la pollution désigne «toute contamination ou modification directe ou indirecte de l'environnement provoquée par tout acte et susceptible d'entraîner une gêne ou un danger pour la santé et le bien-être des personnes». Cette pollution peut être d'origine naturelle ou anthropique. La pollution d'origine anthropique, la plus problématique d'ailleurs, est due principalement aux différentes activités domestiques, artisanales ou industrielles que l'homme entreprend pour satisfaire à ses besoins. Les milieux urbains sont les plus exposés aux phénomènes de pollution. En effet, ces milieux concentrent des populations et activités sur un territoire resserré qui doit supporter de nombreux flux: flux de circulation des personnes et des marchandises, acheminement de l'énergie et son utilisation, évacuation des déchets solides et des effluents liquides tant domestiques qu'industriels (Host et Telle-Lamberton, 2014).

Au fur des années, de grandes agglomérations se sont érigées autour des côtes du lac Tanganyika. De ces agglomérations, la ville de Bujumbura, capitale économique actuelle du Burundi, a la plus grande densité de la population et compte le plus grand nombre d'industries, devant les villes d'Uvira, Kalémie et Moba en RDC; Kigoma et Kipili en Tanzanie ainsi que Mpulungu en Zambie (Kelly, 2001). Bujumbura est aussi la plus grande ville du Burundi. Elle comptait 497166 habitants en 2008 (ISTEEBU, 2008). Ce nombre, selon les projections de l'ISTEEBU (2013), devrait atteindre 692364 habitants en 2020 puis 760932 et 825701 habitants respectivement en 2025 et 2030.

En matière d'assainissement des déchets liquides, la ville de Bujumbura dispose de deux systèmes de gestion des eaux usées : il s'agit de l'assainissement collectif (AC) et l'assainissement non collectif (ANC). L'AC utilise un réseau d'égout qui achemine les eaux usées à la station d'épuration de Buterere, une station de type lagunage desservant 9,1% (MEM, 2011) de la population urbaine. L'ANC, quant à lui, traite les eaux usées dans les domiciles des usagers en utilisant diverses technologies dont les fosses septiques et les latrines traditionnelles principalement. Environ 89,9%¹ de la population urbaine font recours à l'ANC (Bigumandondera, 2014 ; MEM, 2011). Pour ce qui est de l'assainissement solide, la gestion qui est appliquée aux déchets solides aussi bien municipaux qu'industriels consiste dans les meilleurs des cas, à les collecter et à les amener à la décharge publique de Mubone, sinon ils sont simplement déposés de manière clandestine dans les caniveaux d'eaux

pluviales, dans les espaces non bâtis ou à côté d'une rue (Mizero et al., 2015 ; Manirakiza et al., 2020a).

La ville de Bujumbura abrite une variété d'industries formelles et informelles, englobant les industries agro-alimentaires, textiles, métallurgiques, chimiques, pharmaceutiques, les savonneries, les tanneries, les raffineries de l'huile de coton, le port et le dépôt de pétrole (Kelly, 2001). A côté de ces industries, Bujumbura compte également un nombre important des structures de soins dont les hôpitaux, les centres de santé, les laboratoires biomédicaux et les cabinets médicaux. À cela s'ajoutent d'autres activités du secteur tertiaire éparpillées dans toute la ville dont les marchés et les magasins, le transport routier, l'administration, les établissements d'enseignement, etc.

Tous ces industries, services et activités divers génèrent des quantités importantes de déchets en termes d'eaux usées, de déchets solides et d'émissions gazeuses qui, s'ils ne sont pas convenablement traités, deviennent malheureusement des sources de pollution de l'eau (nappe phréatique, rivières et lac), des sols et de l'air amplifiant ainsi les effets sur le changement climatique (MINEAGRI, 2019). La sédimentation, causée par le phénomène d'érosion constitue aussi une menace de la qualité des ressources en eau (Ndihokubwayo, 2019 ; Riveros et Nijimbere, 2019). Les conséquences de ces pollutions se répercutent négativement sur la santé humaine, la biodiversité en général, le confort de vie sans oublier le lac Tanganyika, un écosystème exceptionnellement riche et intéressant avec plus de 2000 espèces de plantes et d'animaux dont 600 espèces endémiques au bassin du lac Tanganyika (Coulter, 1994).

Les sources potentielles de pollution en ville de Bujumbura sont nombreuses, les travaux scientifiques s'intéressant aux problèmes de pollution causés par l'une ou l'autre source existent dans la littérature. La question qui reste posée est de savoir si toutes les sources ont déjà été suffisamment investiguées. L'identification et la caractérisation de toutes les sources de pollution constituent un préalable à toute tentative de médiation des pollutions à l'échelle d'une région. Ainsi, dans le contexte qui intéresse cette recherche c'est-à-dire la pollution en ville de Bujumbura, une étude qui viserait à faire le point de ce qui est connu est nécessaire pour avancer vers les mécanismes intégrés de remédiation surtout que les pollutions provenant de différentes sources, selon Le Sauce (1992), agissent souvent de manière cumulative et synergique une fois dans l'environnement.

L'objectif de cette étude vise donc, au travers d'une revue de la littérature, à faire l'état des lieux de la

ceux qui n'ont pas aucun système d'assainissement

¹ Dans ce pourcentage (%) est inclus également

pollution affectant la ville de Bujumbura dans ses divers compartiments du milieu de vie (eau, sol et air). Spécifiquement, il s'agira de documenter les types et sources de pollution, en montrant notamment l'ampleur de la pollution causée par les déchets liquides, solides et gazeux, les impacts associés et les pistes de solutions envisageables. Cette étude aidera les décideurs et les autres intervenants du secteur à la prise de décision pour améliorer la qualité environnementale et sanitaire mais aussi montrer ce qui est déjà connu et faire ressortir, le cas échéant, les nouvelles pistes de recherche ou d'intervention dans le domaine visé par cette recherche.

2. METHODOLOGIE

Cette étude, basée sur une synthèse de la littérature, s'est servie de la méthodologie de recherche documentaire. Les moteurs de recherche académique à accès libre (*Google Scholar*, *FreeFullPDF* et *Microsoft Academic Search*) ainsi que *Google* ont été interrogés en utilisant les mots-clés suivants: charge polluante, polluants, déchets, eau usée, épuration de l'eau, pollution, émission gazeuse, ville de Bujumbura et lac Tanganyika. Dans les réponses obtenues, si le titre se révèle pertinent, le résumé est alors examiné pour ne retenir que les ouvrages répondant aux objectifs visés par cette recherche. Ensuite, les listes de références des ouvrages retenus ont été examinées afin de trouver d'autres documents pertinents. A la fin du processus, 50 références, relatant et expliquant les phénomènes de pollution en ville de Bujumbura, ont été retenues pour la rédaction de cet article. Les documents retenus comprennent notamment des articles scientifiques publiés dans les journaux à comité de lecture, des rapports gouvernementaux et des organisations non gouvernementales ainsi que d'autres documents scientifiques constitués principalement par des thèses et des mémoires de recherche. Les critères d'inclusion sont tous les documents axés sur la

pollution en ville de Bujumbura. Les critères d'exclusion sont des documents qui traitent de la pollution autre que celle affectant la ville de Bujumbura.

3. RÉSULTATS

3.1. Pollution par les déchets liquides

3.1.1. Pollution véhiculée par les rivières et collecteurs

La pollution liquide générée dans une ville donnée se manifeste notamment par l'état de santé des rivières et collecteurs qui la traversent. Afin d'appréhender le niveau de pollution liquide affectant la ville de Bujumbura, une synthèse des résultats de la littérature se rapportant sur l'évaluation de la pollution des rivières et collecteurs municipaux est présentée dans le Tableau 1. Ces rivières et collecteurs traversent la ville de Bujumbura d'Est en Ouest pour se jeter dans le lac Tanganyika. Il s'agit principalement des rivières Kinyankonge, Ntahangwa, Muha, Kanyosha ainsi que le collecteur de Kumase et les collecteurs R₁, R₂ et R₃. Du Nord vers le Sud, la localisation de ces différentes rivières et collecteurs par rapport à la ville de Bujumbura et au lac Tanganyika sont visualisables sur la Figure 1.

Les valeurs présentées dans le Tableau 1 sont des concentrations en différents paramètres des échantillons d'eau prélevés uniquement à l'embouchure, celles du Tableau 2 dérivent du premier et représentent les flux de pollution qui entrent journalièrement dans le lac Tanganyika. Le choix de l'embouchure c'est pour permettre une comparaison aisée des résultats entre différents sites mais aussi se rendre compte de la pollution atteignant directement le lac Tanganyika via ces rivières et collecteurs.



Figure 1: Localisation des rivières/collecteurs investigués (Nduwayezu, 2017)

Tableau 1: Evaluation des paramètres de pollution dans les rivières/collecteurs traversant la ville de Bujumbura

Paramètres	Site											
	Rivière Kinyankonge			Canal Kumase	Rivière Ntakangwa			R ₁	R ₂	R ₃		Rivière Muha
DCO (mg O ₂ /l)	104,80*	155,5	110* 120**	2936,7* 5040**	22,5* 70**	15,00* 74,25**	676*	209*	308*	75* 25**	20* 380**	25* 170**
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	50,93*	78,61	82,5* 60,5**	207,7* 356,5**	5* 2,5**	13,75* 42,50**	39*	51,5*	114*	8,5* 12**	1,5* 6**	8,2* 10,5**
DCO/DBO ₅	2,06*	1,98	1,33* 1,98**	14,14* 14,13**	4,5* 28**	1,09* 1,75**	17,3*	4,06*	2,7*	8,82* 2,08**	13,3* 63,3**	3,04* 16,19**
NH ₄ ⁺ (mg/l)	9,80*	1,88	-	-	-	3,25*; 18,53**	2,44*	2,7*	6,86*	-	-	-
NO ₃ ⁻ (mg/l)	0,97*	1,44	-	-	-	0,27*; 1,97**	0,06*	7,61*	1,58*	-	-	-
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	1,73*	3,19	-	-	-	1,8*; 8,22**	0,45*	0,56*	5,5*	-	-	-
Fe (mg/kg)	-	-	1,338	3,631	1,228	-	-	-	-	1,644	1,330	2,709
Mn (mg/kg)	-	-	0,126	0,02	0,057	-	-	-	-	0,052	0,052	0,049
Cr (mg/kg)	-	-	0,711	1,470	0,259	-	-	-	-	0,763	0,421	0,671
Débit (m ³ /j)	6384,96* 13150,08**	-	7182,432*	3011,04**	12239,42*	56160* 228096**	3980*	2160*	3306*	1719,36**	25404,192**	58211,136**
Sources	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Où R₁, R₂ et R₃ sont des collecteurs. *saison sèche et **saison pluvieuse. **Sources** : 1, Buhungu et al., 2017 ; 2, Buhungu et al., 2018 ; 3, 4, 5, 10, 11 et 12, Nduwayezu, 2017 ; 6, Ntakiyiruta et al., 2017 ; 7, 8 et 9, Ndikumana et al., 2013.

Tableau 2: Evaluation de la charge polluante dans les rivières/collecteurs traversant la ville de Bujumbura

Paramètres	Site											
	Rivière Kinyankonge		Canal Kumase	Rivière Ntakangwa			R ₁	R ₂	R ₃		Rivière Muha	Rivière Kanyosha
	SS	SS	SP	SS	SS	SP	SS	SS	SS	SP	SP	SP
DCO (Kg O ₂ /j)	979,6	790,06	15175,64	275,39	842,4	16936,13	2690,48	451,44	1018,25	42,98	9653,60	9895,90
DBO ₅ (Kg O ₂ /j)	470,2	592,55	1073,44	61,20	772,2	9694,08	155,22	111,24	376,88	20,63	152,42	611,21
NH ₄ ⁺ (Kg/j)	209,5	-	-	-	182,52	4226,62	9,71	5,83	22,68	-	-	-
NO ₃ ⁻ (kg/j)	52,2	-	-	-	15,16	449,35	0,24	16,44	5,22	-	-	-
PO ₄ ³⁻ (Kg/j)	107,8	-	-	-	101,09	1874,95	1,8	1,21	18,18	-	-	-
Sources	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Où R₁, R₂ et R₃ sont des collecteurs. **Abréviations** : SS, saison sèche et SP, saison pluvieuse. **Sources** : 1, Buhungu et al., 2017 ; 2, 3, 4, 10, 11 et 12, Nduwayezu, 2017 ; 5 et 6, Ntakiyiruta et al., 2017 ; 7, 8 et 9, Ndikumana et al., 2013.

3.1.2. Sédimentation

Une autre forme de pollution affectant les rivières et par après le lac Tanganyika est la pollution par les sédiments. Une étude réalisée dans trois principales rivières qui traversent la ville de Bujumbura (Ntakangwa, Muha et kanyosha) a montré que ces rivières sont affectées par le phénomène de sédimentation en provenance des montagnes surplombant la ville de Bujumbura. En effet, sur une période de 31 ans c'est-à-dire de 1982 à 2013, cette étude a montré que les valeurs élevées de sédiments charriés par les rivières Ntakangwa, Muha et kanyosha sont atteintes respectivement en 2010 avec 6000T/an, en 2001 avec 14500T/ an et en 2010 avec 7000T/an (Riveros et Nijimbere, 2019). Selon les mêmes auteurs, pour ces trois rivières, une forte sédimentation est observée pour le mois de février. Il est à signaler que la destination finale de ces sédiments charriés par ces rivières est le lac Tanganyika.

3.2. Pollution par les déchets solides

Les déchets solides comprennent principalement les déchets générés par les ménages et les entités administratives (déchets solides municipaux: DSM), par les entreprises de production des biens et services (déchets industrielles: DI) et par les services de soins (déchets de structure de soins).

3.2.1. Déchets solides municipaux

En ville de Bujumbura, le problème de gestion des DSM se pose avec acuité. En effet, Mizero et *al.* (2015) et Manirakiza et *al.* (2020a) ont montré qu'une partie des DSM est collectée puis acheminée, indépendamment de leur nature, origine et composition, vers la décharge publique de Mubone, une décharge située au Nord-ouest de la ville de Bujumbura. L'autre partie est dépotée soit dans les espaces non bâtis de la ville, soit dans les caniveaux d'eaux pluviales ou dans les rivières.

Les études faites sur les volumes des déchets déversés quotidiennement à la décharge de Mubone montrent un mélange de déchets comprenant les fermentescibles (57%), les verres et céramiques (15%) ainsi que les métaux, papiers-cartons, textiles, cuirs, sachets et bouteilles en plastiques qui représentent entre 2 et 8%. Des produits biomédicaux et autres déchets dangereux ont été également identifiés à raison de 2% de la quantité de DSM triés (Mizero et *al.*, 2015). Aussi, des concentrations en métaux lourds dépassant les valeurs limites acceptables ont été trouvées dans le lixiviat de l'ancienne décharge de Buterere (située

non loin de celle de Mubone). C'est le cas notamment du chrome, cuivre, fer et manganèse (Manirakiza et *al.*, 2020a).

3.2.2. Déchets industriels

Dans la littérature, il se remarque une carence de données se rapportant aux déchets industriels (DI) produits en ville de Bujumbura. Des recherches qui s'intéresseraient à la nature, aux quantités et au mode de gestion appliquée aux DI seraient des références pour des études ultérieures. MEEATU (2017) signale, sans donner plus de détails, que les DI sont déposés et brûlés à la décharge de Mubone, une pratique à conséquences lourdes sur le plan sanitaire et environnemental.

3.2.3. Déchets de structures de soins

Les insuffisances remarquées dans la gestion des DSM ne laissent pas en arrière celle des déchets des structures de soins. En effet, une étude conduite dans les structures de soins de la ville de Bujumbura, montre que les déchets infectieux (flacons de produits sanguins à usage thérapeutiques, tubes de prélèvement de sang, dispositifs de drainages), les déchets de laboratoire (milieu de culture, prélèvement) ainsi que les déchets assimilables aux déchets ménagers sont collectés dans les mêmes poubelles (MSPLS, 2019). La même source indique aussi que, excepté l'hôpital Prince Régent Charles, les autres structures de soins ne disposent pas d'un site de stockage interne bien aménagé qui ferme à clé. En effet, un site de stockage bien aménagé permettrait de contenir les déchets infectieux afin d'éviter leur dispersion par le vent ou les animaux ou l'intrusion des personnes non autorisées. Il se remarque également l'absence d'un système de codage uniforme permettant l'identification, de manière univoque, de différentes catégories de déchets, pour toutes les structures sanitaires, ce qui compromet alors la gestion optimale de ces déchets.

De toutes les étapes de gestion des déchets médicaux (collecte, stockage, transport et élimination/traitement), une étude réalisée dans 12 structures de soins en ville de Bujumbura montre que le stockage est le maillon présentant plus de faiblesse dans le processus de gestion de ces déchets (Niyongabo et *al.*, 2019). Les quantités de déchets médicaux produites journalièrement sont en moyenne de 102 kg pour les hôpitaux de niveau tertiaire² et 2,1 kg pour les centres de santé (MSPLS, 2016).

L'autre faiblesse constatée est le système d'élimination/traitement appliqué aux déchets

² Les hôpitaux de niveau tertiaire sont des structures de soins offrant une expertise spécialisée en différents domaines pour le traitement d'affections avancées ou potentiellement mortelles. La quantification a concerné l'Hôpital Prince Régent Charles, Hôpital

Militaire de Kamenge, Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge, Hôpital Prince Louis Rwagasore et le Centre Neuropsychiatrique de Kamenge

biomédicaux (DBM). En effet, les méthodes admises sont notamment l'incinération, le compostage, l'enfouissement et l'évacuation vers la décharge appelé souvent Centre d'Enfouissement Technique (CET).

Par rapport à l'incinération, il se remarque des structures de soins qui utilisent encore des incinérateurs traditionnels ou artisanaux. Ces derniers n'assurent qu'une combustion insuffisante des déchets et produisent des fumées contenant du monoxyde de carbone, de dioxines et de furanes. L'exposition à ces molécules peut avoir des effets dommageables sur la santé. Des études réalisées dans les structures de soins de référence en 2012 puis en 2019, ont montré que seul le Centre Hospitalo-Universitaire de Kamenge (CHUK) était le seul à remplir les conditions en matière de l'incinération des DBM, avec un incinérateur d'une cheminée de 15 m et une température de combustion de 800°C (MSPLS, 2012 ; MSPLS, 2019).

Parmi les déchets des structures de soins acheminés vers la décharge publique de Mubone, on n'y rencontre des objets tranchants et piquants ainsi que des déchets infectieux mélangés aux déchets assimilables aux déchets ménagers. Les risques de blessure et de coupure demeurent élevés, ce qui fait craindre des cas d'infection par le VIH/SIDA et d'autres affections comme les hépatites B et C et le tétanos (MSPLS, 2019).

3.2.4. Pollution par les émissions gazeuses

3.2.4.1. Secteur industriel

Au niveau du secteur industriel, les émissions gazeuses émanent des procédés industriels et de l'utilisation des produits. Les industries concernées sont notamment les industries agroalimentaires, l'industrie métallurgique, l'industrie minière ainsi que la catégorie des petites et moyennes entreprises.

Dans ce secteur, les données disponibles font état des émissions estimées à 6,4 Gg d'ECO₂ (Giga gramme d'Équivalent CO₂) imputables à deux sous-secteurs, à savoir l'industrie minière et l'industrie métallurgique (transformation du fer et d'acier). Cette dernière totalise à elle seule 6,2 Gg d'ECO₂ (MINEAGRI, 2019).

3.2.4.2. Secteur énergétique

En ville de Bujumbura, les émissions du secteur énergétique concernent principalement les produits pétroliers utilisés dans le transport routier et la biomasse utilisée dans le secteur résidentiel. Les émissions qui proviennent de la biomasse principalement le bois et ses dérivés sont les plus considérables (MEEATU, 2015).

Le transport routier émet des quantités non négligeables de CO₂ consécutives au nombre de véhicules roulant en ville et amplifié par l'âge de ces véhicules. En effet, le Burundi n'applique pas encore la limitation d'âge sur les véhicules importés, ce qui risquerait d'augmenter la quantité des gaz à effet de serre (GES) émises.

Les émissions du secteur résidentiel proviennent essentiellement de l'usage de la biomasse notamment le charbon de bois lors de la cuisson des aliments dans les ménages et les institutions (écoles, hôpitaux, camps militaires). En ville de Bujumbura, Sabuhungu (2016) estime à 83% les ménages qui font recours exclusivement au charbon de bois et Bangirinama et al. (2016) montrent que la quantité de charbon consommée s'élève à 56 548 T/an.

4. DISCUSSION

4.1. Pollution par les déchets liquides

4.1.1. Pollution véhiculée par les rivières et collecteurs

A la lumière des résultats présentés dans le Tableau 1, il apparaît clairement que les rivières et les collecteurs sont affectés différemment par des phénomènes de pollution. Globalement, les collecteurs sont plus pollués comparativement aux rivières.

Ainsi, en termes de DCO et DBO₅, le site du collecteur de Kumase véhicule une quantité de pollution qui dépasse de loin les autres collecteurs, aussi bien en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Pour le collecteur R₃, les valeurs de DCO et de DBO₅ trouvées par Ndikumana et al. (2013) diffèrent de celles trouvées par Nduwayezu (2017) pour la même saison sèche. Cela serait probablement lié au changement d'activités (occasionnant des déversements d'eaux usées) qui se déroulaient le long du collecteur durant la période de 2013 à 2017.

Pour tous les collecteurs, à l'exception de celles trouvées par Nduwayezu (2017) pour R₃, les valeurs de DCO et de DBO₅ sont au-delà des normes de rejet en eau de surface, soit 25 mg O₂/l pour la DBO₅ et 80 mg O₂/l pour la DCO (Bliefert et Perraud, 2001). Les valeurs de DCO et de DBO₅ trouvées par différents auteurs (Tableau 1), témoignent d'un problème réel de pollution véhiculée par ces collecteurs, laquelle pollution débouche directement dans le lac Tanganyika. Il convient de signaler que ces collecteurs étaient conçus pour évacuer seulement les eaux pluviales jusque dans le lac Tanganyika. Mais des eaux usées, probablement en provenance des activités artisanales, domestiques et industrielles des zones traversées par ces collecteurs, s'y déversent via des raccordements sauvages.

En effet, le collecteur de Kumase traverse le quartier industriel de la zone Ngagara, un quartier qui abrite diverses industries et autres activités commerciales variées. Les collecteurs R₁, R₂ et R₃ prennent naissance au centre-ville de Bujumbura. Ils traversent le quartier Asiatique de la zone Rohero, un quartier où se déroulent des activités artisanales diverses dont les garages automobiles et ceux des tricycles, les petites unités de production de biens ou des services ainsi que le commerce général.

Quant à la pollution organique véhiculée par différentes rivières, les résultats du Tableau 1 montrent que la rivière Kinyankonge vient en tête avec des concentrations moyennes variant entre 104,8 et 155,5 mg O₂/l pour la DCO et 50,93 et 82,5 pour la DBO₅. Buhungu et *al.* (2018) ont suivi la variation spatio-temporelle des paramètres de pollution de cette rivière, ils ont remarqué que cette pollution est importante en saison pluvieuse et augmente de l'amont vers l'aval. Selon les mêmes auteurs, cette rivière reçoit principalement et successivement, de l'amont vers l'aval, des rejets domestiques provenant des quartiers traversés, l'effluent qui sort de la station d'épuration de Buterere, les eaux de lessivage en provenance des activités agricoles se déroulant autour de la rivière ainsi que les rejets de l'usine SAVONOR.

En saison pluvieuse, la rivière Muha suivie de celle de Kanyosha affichent des concentrations élevées en

DCO, soit respectivement 380 mg O₂/l et 170 mg O₂/l et le rapport DCO/DBO₅, pour ces deux rivières, est supérieur à 3 comme cela apparaît dans le Tableau 1. Un tel rapport, selon Yapo et *al.* (2009), témoigne d'une pollution moins biodégradable. L'augmentation de la concentration en DCO serait due aux quantités de sédiments charriées par ces deux rivières pendant la période des crues. Riveros et Nijimbere (2019) ont par ailleurs montré que pendant la saison pluvieuse, les rivières traversant la ville de Bujumbura accumulent des quantités importantes de sédiments qui proviennent des montagnes surplombant cette ville. Pour toutes les saisons, Nduwayezu (2017) et Ntakiyiruta et *al.* (2017) ont montré que la rivière Ntakangwa affiche des concentrations faibles en DCO et DBO₅ comparativement aux autres rivières étudiés.

De façon générale, aussi bien pour les collecteurs que les rivières, les concentrations de la pollution carbonée exprimée en termes de DCO sont plus élevées en saison pluvieuse qu'en saison sèche. Cela s'expliquerait par le fait qu'en saison pluvieuse, il y aurait un phénomène de lessivage des terrains et charriage par les eaux de ruissellement, vers ces rivières et collecteurs, des déchets de différentes sortes y compris les sédiments.

Pour une appréciation rapide de la qualité de l'eau des rivières, il est d'usage de catégoriser l'eau en 5 classes (Tableau 3).

Tableau 3: Grille d'évaluation de la qualité des eaux de rivière (modifiée) (Laronde et Petit, 2010)

Code	Groupe de paramètres	1A Excellente	1B Bonne	2 Passable	3 Médiocre	Hors classe Pollution excessive
	Conductivité (µS/cm)	≤ 400	400 à 700	750 à 1500	1500 à 3000	> 3000
	Chlorures (mg/l)	≤ 100	100 à 200	200 à 400	400 à 1000	> 1000
	Température (°C)	≤ 20	20 à 22	22 à 25	25 à 30	> 30
	pH	6,5 à 8,5		6 à 6,5 ou 8,5 à 9	5,5 à 6 ou 9 à 9,5	< 5,5 ou > 9,5
MES	Matières en suspension (mg/l)	≤ 30	-	-	30 à 70	> 70
OX Matières organiques (oxydables)	Oxygène dissout (mg/l)	> 7	5 à 7	3 à 5	≤ 3	-
	Saturation (%)	> 90	70 à 90	50 à 70	≤ 50	
	DBO ₅ (mg/l)	≤ 3	3 à 5	5 à 10	10 à 25	>25
	DCO (mg/l)	≤ 20	20 à 25	25 à 40	40 à 80	>80
Azote	Azote ammoniacal (NH ₄)(mg/l)	≤ 0,1	0,1 à 0,5	0,5 à 2	2 à 8	>8
	Azote Kjeldahl (NK) (mg/l)	≤ 1	1 à 2	2 à 3	> 3	-
	NO ₃ (mg/l)	< 5	5 à 25	25 à 50	50 à 100	>100
P (Matières phosphorées)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	< 0,2	0,2 à 0,5	0,5 à 1	1 à 5	>5
	Phosphore total (mg/l)	< 0,1	0,1 à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 2,5	>2,5

La comparaison des valeurs de la DCO et DBO₅ du Tableau 1 à celles de la grille d'évaluation (Tableau 3) montre que la rivière Kinyankonge, pour toutes les saisons et les rivières Muha et Kanyosha, en saison pluvieuse, sont classées entre les catégories Médiocre et hors classe. Pendant la saison sèche, les rivières Ntakangwa, Muha et Kanyosha sont classées entre les catégories bonne et passable.

Il convient de signaler que la catégorie hors classe désigne les eaux considérées comme impropre à la plupart des usages et peuvent constituer une menace pour la santé publique et l'environnement. Les catégories passable et médiocre sont des catégories pour lesquelles leurs eaux peuvent être utilisées en irrigation tandis que pour l'approvisionnement en eau potable, il convient de disposer les eaux des catégories excellente ou bonne (Laronde et Petit, 2010).

Le rapport DCO/DBO₅ (Tableau1), qui désigne l'indice de biodégradabilité, montre que la pollution véhiculée par différentes rivières est facilement biodégradable sauf celle véhiculée par la rivière Muha aussi bien en saison sèche qu'en saison pluvieuse et celle véhiculé par la rivière Kanyosha en saison pluvieuse. Quant aux différents collecteurs, la tendance est à la non-biodégradabilité sauf pour la pollution véhiculée par le collecteur R₃, une raison de penser que ces collecteurs véhiculeraient des eaux usées industrielles avec une composition et des concentrations extrêmement variables selon le type d'industrie (Shi, 2000). En effet, pour estimer la biodégradabilité d'un effluent, la littérature évoque un rapport DCO/DBO₅ < 2 qui caractérise un effluent facilement biodégradable ; 2 < DCO/DBO₅ < 3 qui caractérise un effluent biodégradable avec des souches sélectionnées et DCO/DBO₅ > 3 qui caractérise un effluent non biodégradable (Yapo et al., 2009).

Pour ce qui est de l'azote et du phosphore, les valeurs du Tableau 1 montrent que les différents collecteurs et rivières contiennent des concentrations non négligeables en ces nutriments. Les quantités de nutriments qui sont envoyés journalièrement dans le lac Tanganyika via ces rivières et collecteurs ont un impact déjà observable sur cet écosystème notamment la forte poussée d'algues et de plantes à divers endroits du lac, signe évident d'une eutrophisation (Ntakiyiruta et al., 2017 et Ndikumana et al., 2013). Globalement, comme le montre le Tableau 2, la charge polluante en nutriments des rivières se révèle plus élevée que celle véhiculée par les collecteurs.

Les valeurs présentées dans le Tableau 2 expriment le degré de pollution, sous forme de charges polluantes ou flux polluants (en Kg/j), qui est rejetée journalièrement dans le lac Tanganyika. Ce tableau

dérive du premier ; c'est le produit entre le débit et les concentrations mesurés dans les rivières et collecteurs.

Les résultats du Tableau 2 montrent que d'importantes quantités de flux polluants entrent journalièrement dans le lac via les rivières/collecteurs étudiés. La rivière Ntakangwa, suite aux débits importants qui la traversent en saison pluvieuse notamment, affiche des valeurs élevées en différents paramètres malgré des valeurs faibles mesurées en termes de concentrations (mg/l). Ces charges polluantes sont d'autant plus inquiétantes du moment qu'il est connu que le lac Tanganyika est presque fermé et donc par conséquent vulnérable suite à son faible taux de renouvellement. En effet, de nombreuses rivières drainent un bassin d'alimentation d'une superficie de 250000 km² mais une seule en sort, la rivière Lukuga. L'autre phénomène traduisant une situation de vulnérabilité est l'importante proportion d'eau profonde désoxygénée, ce qui entrave le processus d'autoépuration (PEP, 2007).

A l'embouchure des rivières et collecteurs qui traversent la ville de Bujumbura, certains métaux ont été détectés avec des valeurs au-delà des limites acceptables pour l'eau destinée à des fins de consommation (Nduwayezu, 2017). Il s'agit notamment du manganèse, chrome et fer (Tableau 1). Aussi, les analyses effectuées dans le bassin du port du Bujumbura font état des concentrations plus élevées en métaux lourds que celles recommandées notamment pour l'arsenic (0-24 mg/kg), le plomb (30-130 mg/kg), le zinc (70-240 mg/kg), le cadmium (0-0,8 mg/kg) et le cuivre (10-60 mg/kg). Le canal d'évacuation des eaux pluviales en provenance de la zone résidentielle de Buyenzi, débouchant dans la zone portuaire, serait la principale source de ces métaux (MFBCDE, 2019).

En l'absence d'une application rigoureuse des règlements et lois en vigueur notamment les codes de l'eau (Code de l'eau de la République du Burundi, 2012) et de l'environnement (Code de l'Environnement de la République du Burundi, 2000) ainsi que la Politique Nationale d'Assainissement (PNA) (MEEATU, 2013a), les activités, qu'elles soient d'ordre domestique, artisanal ou industriel, organisées autour des rivières et collecteurs traversant la ville de Bujumbura, conduisent inévitablement à la pollution de ces derniers et par conséquent affecte le lac Tanganyika. Dans une étude menée dans 4 zones de la ville de Bujumbura (Kinama, Cibitoke, Musaga et Kinindo), Bigumandondera (2014) a constaté que la majorité des eaux usées ménagères (eaux usées de cuisine, de lessive et de douche), en provenance des maisons d'habitation, sont déversées dans les caniveaux qui transportent les eaux pluviales. Ces eaux usées devraient normalement être traitées dans la parcelle même de leur production pour le cas de

L'assainissement non collectif ou envoyées à la station d'épuration de Buterere via le réseau d'égout aménagé. Aussi, sur environ une centaine d'entreprises implantées dans la ville de Bujumbura, seules 5 sont raccordées au réseau d'égout et envoient leurs eaux usées industrielles à la station d'épuration de Buterere pour subir un traitement avant leur rejet dans la nature (MINEAGRI, 2018). Les autres entreprises, non raccordés à la station d'épuration, ont-ils la capacité requise en termes de moyens, de technologies et d'espace pour traiter convenablement sur site les eaux usées qu'ils génèrent avant leur rejet dans le milieu récepteur? La situation rencontrée dans les différents collecteurs et rivières nous fait craindre des déversements illégaux d'eaux usées y compris celles de ces industries non raccordées. Des études approfondies devraient montrer le chemin le plus adéquat pour gérer convenablement les eaux usées industrielles et autres catégories produites en ville de Bujumbura.

4.1.2. Sédimentation

L'augmentation de la déforestation dans les montagnes surplombant la ville de Bujumbura et l'érosion conséquente sont les causes probables du phénomène de sédimentation observé dans les rivières qui traversent la ville de Bujumbura (Kelly, 2001). Ndiokubwayo (2019) a par ailleurs montré que le bassin versant de la rivière Ntakangwa, dans la période de 1996 à 2015, a connu une évolution régressive en termes de couverture végétale. Les actions anthropiques liées à l'agriculture, à la construction et à la recherche du bois de chauffage seraient à la base de cette dégradation donc de l'érosion du sol.

La sédimentation peut avoir un profond effet négatif sur la biodiversité en altérant les habitats et en interrompant la production primaire et les trames alimentaires, causant par-là une réduction de la diversité des espèces. Il apparaît que la plus grande partie de la déposition des sédiments se passe dans la zone littorale, précisément là où la plus grande biodiversité du lac est concentrée malheureusement (Kelly, 2001). Les autres conséquences découlant de la sédimentation est le débordement des rivières causant des inondations meurtrières. On citera ici le cas des inondations survenues au nord de la ville de Bujumbura, en février 2014 dans le quartier Gatunguru suite au débordement de la rivière Gasenyi et en décembre 2019, dans le quartier Winterekwa, suite au débordement de la rivière Cari. Les inondations affectant les zones résidentielles ont comme autres conséquences de provoquer le débordement des latrines, avec des risques d'apparition des maladies des mains sales suite à la dispersion des matières hautement pathogènes (excréments) qui étaient jusque-là confinées dans ces latrines. Des actions allant dans le sens de la

conservation des sols des bassins versant de différentes rivières ainsi que des efforts de reforestation des montagnes surplombant la ville de Bujumbura limiteraient davantage la quantité des sédiments charriés dans ces rivières.

4.2. Pollution par les déchets solides

Le dépotage illégal des déchets solides (ménagers, industrielles et de structure de soins) constaté dans le cadre de cette étude, occasionne des conséquences néfastes notamment sur le plan sanitaire (gènes olfactives, inconfort du milieu de vie, prolifération des mouches) et environnementale (pollution des eaux de surface, inondation due aux bouchages des caniveaux transportant les eaux pluviales).

Dans une étude conduite au Nord de la ville de Bujumbura, en zone Kinama (Commune Ntakangwa), Ngahane et *al.* (2015) ont estimé une production des DSM à 0,38kg/j.hab. Mizero et *al.* (2015), en se basant sur le relevé des volumes des DSM déversés quotidiennement à la décharge publique de Mubone, ont estimé cette production à 0,6 kg/j.hab. Des quantités suffisantes pour occasionner de nuisances environnementales et sanitaires si des mesures de leur bonne gestion ne sont pas prises.

Aussi, des concentrations non négligeables en métaux lourds ont été identifiées à l'ancienne décharge de Buterere. Ces métaux lourds se retrouveront par la suite dans la nappe phréatique par transfert du lixiviat ou seront bioaccumulés dans les végétaux qui pousseront sur le site de cette ancienne décharge ou encore emportés par les eaux de ruissellement jusque dans les cours d'eau.

Il faut noter que la décharge de Mubone, tout comme d'ailleurs l'ancienne décharge de Buterere, n'est pas aménagée et les déchets qui y sont entassés, sont brûlés à l'état encore humide et à l'air libre avec dégagement des fumées toxiques contenant notamment de dioxines, des chlorofluorocarbones (CFC) et du CO₂ (MSPLS, 2019 et MSPLS, 2009). Ce brûlage des déchets constitue une pollution évidente de l'air et un risque sanitaire élevé pour les récupérateurs d'objets abandonnés dans la décharge, ceux qui viennent y déposer les déchets sans oublier les personnes vivant autour de la décharge.

Egalement, les risques de pollution de l'eau souterraine et de l'eau de surface ne sont pas à exclure. En effet, d'une part, le site de Mubone se trouve sur un sol sablonneux avec une nappe phréatique peu profonde (Hakiza, 2002 ; MEEATU, 2013 b), et d'autre part, la rivière Kinyankonge, affluent du lac Tanganyika, passe non loin de ce site.

Aussi bien pour les DSM que pour les DBM et DI, une bonne gestion nécessite de travailler successivement et hiérarchiquement sur la minimisation de leur production, tri à la source, collecte et stockage séparés de différentes fractions, réutilisation/recyclage, valorisation énergétique ou matière et enfin mise en CET pour les déchets dont les caractéristiques ne permettent pas un recyclage ou une éventuelle valorisation. Pour ce qui est de la valorisation énergétique, la fabrication des briquettes combustibles à partir des déchets solides municipaux est déjà une réalité en ville de Bujumbura et les études ont montré que ces briquettes peuvent constituer une alternative intéressante au charbon de bois (Dusabe, 2013 ; Mizero et *al.*, 2014 ; Sinzinkayo et Ndikumana, 2019 ; Manirakiza et *al.*, 2020b).

4.3. Pollution par les émissions gazeuses

La ville de Bujumbura se trouve confrontée également aux phénomènes de pollution par les gaz provenant principalement des secteurs industriel et de l'énergie.

En ville de Bujumbura, l'usage du charbon de bois à grande échelle dans le secteur résidentiel (Bangirinama et *al.*, 2016) comporte de graves conséquences sur le plan environnemental et sanitaire notamment:

- la pollution de l'air due aux quantités importantes de fumées libérées lors de la cuisson des aliments. En effet, 59,5% des ménages de la ville de Bujumbura utilisent les braseros non améliorés (Sabuhungu, 2016). Ces braseros sont le siège d'une combustion incomplète produisant des gaz à l'origine de la pollution de l'air (WHO, 2009). MINEAGRI (2019) a par ailleurs montré, dans sa troisième communication nationale sur les changements climatiques, que le secteur de l'énergie vient en deuxième position parmi les secteurs émetteurs des GES en termes d'Équivalent CO₂ après le secteur de l'Agriculture, de la Foresterie et des Autres utilisations des Terres (AFAT). Le secteur industriel vient en dernière position en raison probablement du faible taux d'industrialisation que connaît le Burundi.
- la prévalence des infections respiratoires et les autres maladies pour les utilisateurs du charbon de bois. En effet, plusieurs auteurs (Collings et *al.*, 1990 ; Bruce, 2001 ; Bautista et *al.*, 2009) s'accordent en montrant le lien entre l'exposition prolongée aux fumées émises lors du brûlage du charbon de bois dans les habitations et la manifestation de certaines maladies en l'occurrence

les infections aiguës des voies respiratoires, la toux, les maux de tête, les brûlures des yeux et l'asthme.

5. CONCLUSION

L'objectif de cette étude est de faire l'état des lieux de la pollution en ville de Bujumbura. A partir d'une revue de la littérature, les recherches effectuées sur le sujet ont permis de se rendre compte que la ville de Bujumbura est confrontée à trois types de pollution : pollution par les déchets liquides, pollution par les déchets solides et pollution par les émissions gazeuses.

Pour ce qui est de la pollution par les déchets liquides, les déversements illégaux d'eaux usées industrielles, artisanales et ménagères dans les rivières et collecteurs qui traversent la ville de Bujumbura ainsi que le phénomène de sédimentation seraient les principales sources de pollution. Cette pollution se manifeste notamment par des concentrations, en différents types de polluants et autres paramètres indicateurs de pollution, qui sont au-delà des seuils acceptables dans ces rivières et collecteurs. Pour une meilleure estimation de la pollution et de ses impacts, l'évaluation devrait s'exprimer en charge polluante (kg/j) obtenue par mesure simultanée de la concentration pour différents paramètres et du débit. Cela est d'autant plus important dans le cas qui concerne la ville de Bujumbura où cette pollution véhiculée par ces rivières et collecteurs débouche directement dans le lac Tanganyika presque fermé et où les effets cumulatifs de polluants qui y entrent ne sont pas à exclure. Si globalement la pollution véhiculée par les rivières et collecteurs traversant la ville de Bujumbura est bien documentée, il se remarque néanmoins dans la littérature disponible une insuffisance de données qui renseignent sur la provenance de cette pollution. Les recherches ultérieures devraient se concentrer prioritairement sur l'identification des pollueurs, les méthodes de confinement des pollutions sur le site de production et leur caractérisation, suivi de la mise en place des techniques de leur traitement.

Quant aux problèmes de sédimentation, les études ont montré que ce phénomène est plus important en saison pluvieuse et la source de ces sédiments serait liée à l'érosion se produisant dans les montagnes qui surplombent la ville de Bujumbura. Des alternatives incluant la reforestation et les techniques de conservation des terres dans les montagnes surplombant la ville de Bujumbura, la stabilisation des berges des rivières traversant la ville de Bujumbura par les techniques du génie végétale (Schiechl et Stern, 1997; Peeters et *al.*, 2018) qui visent à préserver au maximum le caractère naturel des berges en utilisant des éléments naturels (végétaux) ainsi que le piégeage des sédiments

constitueraient certaines des solutions de remédiation.

Concernant la pollution par les déchets solides, il se remarque un manque de méthodologie claire et efficace de la gestion de ces déchets notamment en matière de tri, de collecte, de stockage et des options de traitement. La méthode en vigueur consiste simplement à les collecter indistinctement de leur nature et origine et à les déposer à la décharge incontrôlée de Mubone avant de les brûler à ciel ouvert. Ce procédé est très dangereux car les déchets subissent une transformation conduisant à la formation de nouveaux produits chimiques dont les propriétés et le degré de dangerosité ne sont pas connus d'avance. Les stratégies de minimisation des quantités produites, le tri à la source, la collecte séparée, la mise en place des options de traitement appropriées à chaque catégorie de déchets minimiseraient les impacts environnementaux et sanitaires associés à ces déchets. Parmi les déchets produits en ville de Bujumbura, ceux industriels sont les moins connus aussi bien en qualité qu'en quantité.

La pollution par les émissions gazeuses en ville de Bujumbura est principalement d'origine industrielle et énergétique. Le secteur de l'énergie particulièrement le secteur résidentiel occupe une place prépondérante en termes des émissions polluantes. La cuisson des aliments avec du bois et ses dérivés, dans des foyers (braseros) traditionnels et en milieu non aéré, produit des quantités importantes de fumées avec libération des gaz à effet serre et d'autres polluants à l'origine des maladies respiratoires. L'utilisation des foyers améliorés consommant moins de charbon tout en réduisant la quantité de fumées produite, l'amélioration de la qualité des briquettes combustibles produites à base des déchets solides et le recours aux énergies renouvelables sont certaines des pistes qu'il convient d'explorer afin de résoudre les problèmes de pollution causée par les émissions gazeuses du secteur résidentiel.

6. BIBLIOGRAPHIE

Bangirinama F., Nzitwanayo B. et Hakizimana P., 2016. Utilisation du charbon de bois comme principale source d'énergie de la population urbaine: un sérieux problème pour la conservation du couvert forestier au Burundi. *Bois & forêts des tropiques*, 328, 45-53.

Bautista L. E., Correa A., Baumgartner J., Breyse P. et Matanoski G. M., 2009. Indoor charcoal smoke and acute respiratory infections in young children in the Dominican Republic. *American journal of epidemiology*, 169 (5) : 572-580.

Bigumandondera P., 2014. Étude de l'assainissement non collectif en Afrique Subsaharienne: Application

à la ville de Bujumbura. *Thèse de Doctorat*, Université de Liège, Arlon, Belgique, 276 p.

Bliefert C., Perraud R., 2001. *Chimie de l'Environnement : Eau, Air, Sols, Déchets*. Paris, Deboeck, Université, 477 p.

Bruce N., Perez-Padilla R. et Albalak R., 2001. La pollution de l'air des habitations dans les pays en développement: un problème majeur pour l'environnement et la santé publique. *Bulletin de l'Organisation mondiale de la santé: la revue internationale de santé publique: recueil d'articles* 2001; 4: 38-52.

Buhungu S., Houssou A. M., Montchowui E., Ntakimazi G., Vassel J. L. et Ndikumana T., 2017. Établissement du pollutogramme et de l'hydrogramme de la rivière Kinyankonge, Burundi. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(3): 1386-1399.

Buhungu S., Montchowui E., Barankanira, E., Sibomana C., Ntakimazi, G. et Bonou C. A., 2018. Caractérisation spatio-temporelle de la qualité de l'eau de la rivière Kinyankonge, affluent du Lac Tanganyika, Burundi. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 12(1): 576-595.

Collings D.A., Sithole S. D., Martin K. S., 1990. Indoor wood smoke pollution causing lower respiratory disease in children. *Tropical Doctor*, 20: 151-155.

Coulter G.W., 1994. Lake Tanganyika. In: *Speciation in Ancient Lakes*. Edited by Martens K., Goddeeris B. and Coulter G. *Archiv für Hydrobiologie* 44: 13-18.

Dusabe M. S., 2013. Étude de faisabilité technique et financière de la valorisation des déchets ménagers organiques, papiers et cartons pour la fabrication des briquettes combustibles à Bujumbura, Burundi. Mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Institut international d'ingénierie, Burkina Faso, 64 p.

Hakiza G., 2002. Potentialités aquifères de la plaine de la Rusizi (au nord du lac Tanganyika), Burundi. *Thèse de Doctorat*, Université de Liège, Liège, Belgique, 442 p.

Host S., Telle-Lamberton M., 2014. Le milieu urbain, réceptacle de nuisances multiples. Territoires, incubateurs de santé ? *Les Cahiers de l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme Île-de-France*, 170-171: 36-40.

ISTEEBU (Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi) , 2008. Recensement général de la population et de l'habitat du Burundi

2008- Synthèse des résultats définitifs. Bujumbura, Burundi, 24 p.

ISTEEBU (Institut de Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi) , 2013. Rapport des projections démographiques du Burundi 2008-2030. Bujumbura, Burundi, 91 p.

Kelly W., 2001. Lac Tanganyika: Résultats et constats tirés de l'initiative de conservation du PNUD/GEF (Raf/92/G32) qui a eu lieu au Burundi, en République Démocratique du Congo, en Tanzanie et en Zambie. Projet sur la Biodiversité du Lac Tanganyika, 155 p.

Laronde S. et Petit K., 2010. Bilan national des efforts de surveillance de la qualité des cours d'eau, rapport final, Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, Limoges, France, 330 p.

Le Sauce C., 1992. L'effet de seuil et la protection de l'environnement. Revue juridique de l'Ouest, N° Spécial 1992. L'environnement. pp. 76-91.

Loi n°1/010 du 30 Juin 2000 portant Code de l'Environnement de la République du Burundi, 33 p.

Manirakiza N., Ndikumana T. et Jung C. G., 2020a. Municipal Solid Waste Sorting in Burundi, Inventory and Perspectives: Case of Bujumbura City. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 5(3): 1148-1155.

Manirakiza N., Ndikumana T. et Jung C. G., 2020b. Towards the Promotion of Fuel Briquettes Using Municipal Solid Waste and Residual Biomass in Burundi. *International Journal of Environment*, 9(1):14-31.

MEEATU (Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme), 2013a. Politique nationale d'assainissement et stratégie opérationnelle 2025. Bujumbura, Burundi, 67 p.

MEEATU (Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme), 2013b. Plan directeur d'assainissement des eaux usées et des excreta de la ville de Bujumbura, Rapport Groupement FWT-SHER-GEOSCI - Mars 2013. Bujumbura, Burundi, 255 p.

MEEATU (Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme), 2015. Rapport national pour habitat III, version finale. Bujumbura, Burundi, 71 p.

MEEATU (Ministère de l'Eau, de l'Environnement, de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme), 2017. Plan national de mise en œuvre de la

convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants au Burundi révisé et actualisé. Bujumbura, Burundi, 191 p.

MEM (Ministère de l'Énergie et des Mines), 2011. Couverture en Assainissement de base- Mairie de Bujumbura, Milieu Urbain. Bujumbura, Burundi, 9 p.

MFBCDE (Ministère des Finances, du Budget et de la Coopération au Développement Économique), 2019. Projet de développement du corridor de transport sur le port de Bujumbura et du lac Tanganyika, résumé de l'étude d'impact environnemental et social. Bujumbura, Burundi, 34 p.

MINEAGRI (Ministère de l'Environnement, l'Agriculture et de l'Élevage), 2018. Rapport sur l'identification et la priorisation des technologies d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre au Burundi. Bujumbura, Burundi, 50 p.

MINEAGRI (Ministère de l'Environnement, l'Agriculture et de l'Élevage), 2019. Troisième Communication Nationale sur les Changements Climatiques (TCNCC). Bujumbura, Burundi, 189 p.

Mizero M., Ndikumana T. et Jung C. G., 2014. Briquettes From Solid Waste: A substitute For Charcoal in Burundi. 5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation - August 25-28, 2014 - Rio de Janeiro, Brazil.

Mizero M., Ndikumana T. et Jung C. G., 2015. Quantification, caractérisation et voies de valorisation des déchets solides municipaux dans la ville de Bujumbura. *Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité*, 1:1-7.

MSPLS (Ministère de la santé Publique et de la Lutte contre le sida), 2009. Classification et gestion des déchets biomédicaux produits dans les structures de soins, Rapport. Bujumbura, Burundi, 120 p.

MSPLS (Ministère de la Santé Publique et de la Lutte contre le Sida), 2012. Plan de gestion des déchets biomédicaux, Projet d'appui au développement du secteur de la santé publique au Burundi - fonds additionnels (PADSS-FA). Bujumbura, Burundi, 50 p.

MSPLS (Ministère de la Santé Publique et de la Lutte contre le Sida), 2016. Plan actualisé de gestion des déchets médicaux dans le cadre du projet de transformation du secteur santé «Projet Kira». Bujumbura, Burundi, 84 p.

MSPLS (Ministère de la Santé Publique et de la Lutte contre le Sida), 2019. Plan de gestion des déchets médicaux et fécaux du projet Nkuriza, rapport final. Bujumbura, Burundi, 60 p.

- Ndihokubwayo E., 2019. Contribution de la télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans l'étude de la dynamique spatio-temporelle de l'environnement urbain et périurbain de la partie nord de la mairie de Bujumbura, Burundi. Mémoire de Master, Université de Liège, Arlon, Belgique, 83 p.
- Ndikumana T., Bizindavyi E., Kisoholo A. et Vasel J.L., 2013. Impact des collecteurs d'eaux pluviales sur la baie Nord-est du lac Tanganyika. *Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité*, 12: 55-60.
- Nduwayezu L., 2017. Evaluation de la pollution dans la zone littorale nord-est du lac Tanganyika située du côté de la ville de Bujumbura/Burundi. Mémoire, Université du Burundi, Bujumbura, Burundi, 127 p.
- Ngahane E. L., Mindele L. U., Nsavyimana G., Bigumandondera P., Vasel J. L., et Ngnikam E., 2015. Analyse comparative des résultats de caractérisation d'ordures ménagères: cas des communes de Bembéréké (Bénin), Kinama (Burundi), Gombe et Kimbanseke (RDC). *Déchets sciences et techniques*, 69: 13-22.
- Niyongabo E., Jang Y. C., Kang D. et Sang K., 2019. Generation, management practices and rapid risk assessment of solid medical wastes: a case study in Burundi, *Journal of Material Cycles and Waste Management* 21: 950–961.
- Ntakiyiruta P., Nahimana D. et Ntakimazi G., 2017. Contribution à l'estimation quantitative des nutriments apportés par la rivière Ntahangwa au lac Tanganyika. *Afrique Science*, 13(1): 360-370.
- Peeters A., Houbrechts G., Hallot E., Campenhout J. V., Verniers G., & Petit F., 2018. Efficacité et résistance de techniques de protection de berges en génie végétal. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 24(2).
- Profil Environnemental de Pays (PEP) du Burundi, 2007. Contrat spécifique n°2006/132723 FWC.
- BENEF – lot 6 Rapport final, Bujumbura, Burundi, 105 p.
- République du Burundi, 2012. Code de l'eau du Burundi, 54 p.
- Riveros L. C. et Nijimbere G., 2019. Application of the SWAT model focused on the volume of sediments discharged by the Ntahangwa, Muha and Kanyosha rivers in the city of Bujumbura Mairie. *Erosion Control*, 11 p.
- Sabuhungu E. G., 2016. Analyse de la demande en charbon de bois par les ménages urbains de Bujumbura au Burundi. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Gembloux, Belgique, 212 p.
- Schiechtl H. M., Stern R., 1997.** Water Bioengineering Techniques: for Watercourse, Bank and Shoreline Protection. Wiley-Blackwell, Oxford, 186 p.
- Shi H., 2000. Industrial wastewater types, amounts and effects, in: point sources of pollutions: local effects and it's control. Encyclopedia of Life Support Systems, Paris, France, 6 p.
- Sinzinkayo E. et Ndikumana E., 2019. Fabrication des briquettes combustibles à base des déchets solides ménagers et de bouse de vache. *Bulletin Scientifique sur l'Environnement et la Biodiversité*, 3: 45-53.
- Yapo B. O., Mambo V., Séka A., Yapi A. D. et Houenou P., 2009. Caractérisation par fractionnement gravimétrique de la matière organique contenue dans les eaux usées: application à l'étude de la biodégradabilité. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*, 27: 21-37.
- WHO (World Health Organisation), 2009. Health statistics and Health Information systems. Global Burden Disease. www.who.int/healthinfo/global_burden_disease, consulté le 07 juillet 2020.