

Approvisionnement et évaluation de la qualité des eaux souterraines de Selembao et Kimbanseke

Supply and assessment of groundwater quality of Selembao and Kimbanseke

Florent B. Mukeba, Michel L. Kapembo, Lay Tshiala
Pius M. Mpiana, Crispin K. Mulaji, John Poté¹

- ¹ John Poté, spécialiste des questions environnementales, est Chercheur associé au Centre de Recherche en Sciences Humaines (CRESH) et Professeur à l'Université de Kinshasa. Email : John.Pote@unige.ch. Tél. : +41 78 636 43 36. Il a été au carrefour des échanges entre les différents co-auteurs du présent papier : Florent B. Mukeba du Département de Géographie, Géostratégie, Environnement et Aménagement du territoire du CRESH ; Michel L. Kapembo, Pius M. Mpiana et Crispin K. Mulaji de l'Ecole de Santé Publique et du Département de Chimie des Facultés des Sciences de l'Université de Kinshasa ainsi que Lay Tshiala du Département de sociologie et anthropologie de l'Université Pédagogique Nationale de la RDC à Kinshasa.



Received: 19 november 2022

Accepted: 16 february 2022

available online: 9 june, 2023

Résumé. Dans de nombreuses municipalités suburbaines des pays d'Afrique subsaharienne, l'eau utilisée dans les ménages provient principalement des eaux souterraines, notamment des puits et des ruisseaux. Ces sources sont vulnérables en raison des mauvaises conditions d'hygiène et d'assainissement qui prévalent, entraînant ainsi la persistance et la récurrence des maladies d'origine hydrique. Dans cette recherche, une étude sur l'utilisation des ressources en eau et une enquête épidémiologique sur les maladies hydriques ont été menées auprès des utilisateurs des points d'eau et des institutions médicales dans les communes suburbaines de Selembao et de Kimbanseke dans la ville de Kinshasa, en RDC. Les résultats de l'enquête indiquent que les usagers des points d'eau sélectionnés encourent le risque d'attraper des maladies hydriques, faute d'habitudes hygiéniques adaptées et du fait d'une forte pollution microbiologique. D'où la nécessité de sensibiliser davantage les concernés.

Mots-clés : Eau potable, pollution microbiologique, épidémiologie, maladies d'origine hydrique, risque humain, Kinshasa-RDC.

Abstract. In many suburban municipalities in Sub-Saharan African countries, the water used in households comes mainly from groundwater, including wells and streams. These springs are vulnerable due to the prevailing poor hygiene and sanitation conditions, leading to the persistence and recurrence of waterborne diseases. In this research, a study on the use of water resources and an epidemiological survey on waterborne diseases were carried out among users of water points and medical institutions in the suburban communes of Selembao and Kimbanseke in the city of Kinshasa, in the DRC. The results of the survey indicate that the users of the selected water points run the risk of catching waterborne diseases, due to a lack of appropriate hygienic habits and due to high microbiological pollution. Hence the need to raise awareness among those concerned.

Keywords: Drinking water, microbiological pollution, epidemiology, waterborne diseases, human risk, Kinshasa-DRC.

1. Introduction

Les sources d'eau contaminées à usage domestique et le manque d'assainissement sont liés à la transmission des maladies telles que la diarrhée, le choléra, l'hépatite A, la typhoïde, la dysenterie et la polio (Montgomery et Elimelech, 2007 ; OMS, 2011). D'autres maladies causées par l'eau contaminée sont transmissibles aux communautés vulnérables (les populations pauvres) car ces dernières vivent dans un environnement accessible à la reproduction d'insectes, vecteurs qui transportent des parasites tels que le paludisme, la filariose et les trypanosomes (OMS, 2017 ; OMS, 2010). Les populations pauvres sont défavorisées dans la mesure où beaucoup d'entre-elles vivent dans des pays où l'eau potable est insuffisante, principalement en Afrique subsaharienne, en Asie et au Moyen-Orient. Dans les pays en développement, 21 % de la population ne disposent pas de services d'assainissement, 22 % des établissements de santé n'ont pas de services d'eau et 22 % n'ont pas de services de gestion des déchets. Quelque 2,1 milliards de personnes, soit 30% de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à l'eau potable et 60% ne disposent pas d'un assainissement fiable (OMS & UNICEF, 2018).

Dans le monde, au moins 2 milliards de personnes utilisent une source d'eau potable contaminée par des matières fécales (OMS, 2019). Chaque année, environ 4 milliards des cas de maladies diarrhéiques sont attribués à une eau dont l'assainissement et l'hygiène sont inadéquats. On estime qu'environ un million de personnes meurent chaque année de diarrhée, la plupart d'entre elles étant des enfants de moins de 5 ans dans les pays en développement (OMS, 2011 ; 2019). Dans ces derniers, principalement ceux de l'Afrique subsaharienne et au Sud de l'Asie, environ 435 millions de personnes boivent de l'eau provenant de puits et de sources non protégés et 144 millions de personnes recueillent

de l'eau de surface non traitée provenant de lacs, d'étangs, de rivières et de ruisseaux (OMS, 2017 ; 2019). En République Démocratique du Congo (RDC), dont la population actuelle est estimée à environ 70 millions d'habitants, malgré le potentiel de son riche réseau d'eau douce, plus de 75% de la population n'a pas accès à l'eau potable (PNUE, 2011 ; Kapembo *et al.*, 2019). Les cours d'eau pollués, les puits peu profonds et les sources contaminées par des micropolluants et des organismes pathogènes sont les sources les plus courantes d'eau domestique ainsi que d'eau potable pour les populations suburbaines et rurales (Kapembo *et al.*, 2016 ; 2019 ; Nienie *et al.*, 2017). Plusieurs causes peuvent justifier la pollution de ces ressources en eau, notamment la vulnérabilité des points d'eau (manque d'étanchéité des puits), l'insalubrité, la contamination par les fosses septiques et les latrines, la présence de décharges non contrôlées, le ruissellement des eaux usées et la défécation à l'air libre (Banks *et al.*, 2002 ; Longo, 2009 ; Kapembo *et al.*, 2016 et 2019 ; Graham et Polizotto, 2013).

Avec ses plus de 16 millions d'habitants, Kinshasa est la plus grande agglomération de la RDC. Environ 75% de cette population habitent dans les municipalités périphériques de la ville. La majorité (plus de 70%) n'a pas accès à l'eau potable fournie par la société nationale d'approvisionnement en eau (Regideso). L'eau potable des ménages provient principalement des eaux souterraines (y compris les puits et les sources) ainsi que des cours d'eau urbains. Les conditions d'assainissement et d'hygiène dans ces municipalités sont très préoccupantes. Par conséquent, les communes suburbaines de Kinshasa sont connues pour ces épidémies récurrentes, principalement des maladies d'origine hydrique, y compris les maladies gastro-intestinales, la typhoïde, le choléra et d'autres maladies diarrhéiques (UNEP, 2011 ; EIES, 2012 ; Kapembo *et al.*, 2019). Nos études précédentes sur l'enquête épidémiologique et l'analyse en laboratoire des bactéries indicatrices de la pollution fécale (FIB) dans les sources d'eau ont été menées dans deux communes de la banlieue de Kinshasa, notamment Bumbu et Mont-Ngafula (Kapembo *et*

al., 2016 ; 2019). Les résultats de ces études ont indiqué que les maladies d'origine hydrique ont affecté plus de 60% des patients admis dans les hôpitaux locaux entre 2013 et 2017. En outre, l'eau des puits étudiés est fortement contaminée par des FIB, en particulier *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterococcus* (ENT) et Coliformes totaux. Ces études recommandent des recherches plus approfondies dans d'autres communes suburbaines de Kinshasa en tenant compte de différents critères, notamment la densité de la population, l'hygiène personnelle, la catégorie des sources d'eau, la fréquence et le nombre d'utilisateurs, l'épidémiologie des maladies hydriques et la situation économique des populations locales. Par conséquent, dans la présente étude, deux communes suburbaines ont été sélectionnées : celle de Selembao (335 581 habitants) et celle de Kimbanseke (la commune la plus peuplée de Kinshasa avec environ 2 millions d'habitants). Les personnes vivant dans ces communes font partie des habitants les plus pauvres de la ville de Kinshasa (EIEs, 2012). Les quartiers de ces communes sont connus pour leur manque d'eau potable, de services d'assainissement et d'électricité, ainsi que pour les épidémies persistantes et récurrentes des maladies hydriques. À notre connaissance, les données sur les maladies hydriques de la population et la qualité de l'eau utilisée à des fins domestiques de ces municipalités sont encore rares.

Les objectifs de la présente recherche sont (i) d'étudier le type d'approvisionnement en eau et les maladies hydriques associées, et (ii) d'évaluer les variations saisonnières de la qualité de l'eau des puits et des sources utilisées par les populations de ces deux communes à des fins domestiques. L'évaluation de la qualité de l'eau est basée sur la détermination de la caractérisation physico-chimique de l'eau, notamment le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions solubles (Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^-) et la quantification des FIB, en l'occurrence *Escherichia coli*, *Enterococcus* et les Coliformes Totaux. L'enquête épidémiologique et l'évaluation de la qualité de l'eau sont très importantes pour la prévention et la réduction de l'impact à long

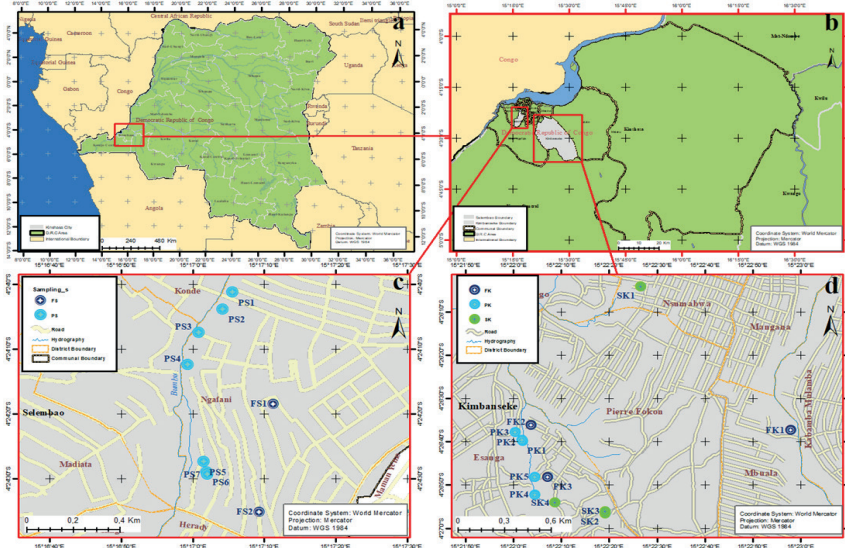
terme des maladies liées à l'eau dans les pays pauvres (OMS, 2019).

2. Matériels et méthodes

2.1. Description des sites d'étude

Cette recherche a été menée dans deux communes suburbaines de la ville de Kinshasa (Fig. 1), à savoir les communes de Selembao (Quartier Ngafani) et de Kimbanseke (Quartier Esanga). Ces communes sont caractérisées par une urbanisation non planifiée, une croissance démographique rapide ainsi que l'arrivée massive des jeunes congolais chassés du milieu rural par la pauvreté et le manque d'emploi. De nombreux quartiers de ces communes sont soumis à de fréquentes inondations et glissements de terrain, tandis que les conditions d'hygiène et d'assainissement y sont médiocres. Les décharges non contrôlées sont très répandues et servent parfois de sites de défécation à l'air libre. Il n'y a pas d'activités industrielles dans ces zones, mais la population pratique une agriculture urbaine intensive, l'élevage du petit bétail et le petit commerce. Les quartiers étudiés (Ngafani et Esanga) ne sont nullement connectés à un réseau public d'approvisionnement en eau (Regideso) et il y manque des services d'assainissement gérés de manière adéquate. Les puits et les sources constituent les principales sources d'approvisionnement en eau à usage domestique (boisson, cuisine et lavage). Il en existe plusieurs, certains sont aménagés (protégés) et d'autres non aménagés (non protégés). Ces quartiers ont été sélectionnés en fonction des résultats et recommandations de nos études précédentes (Kapembo *et al.*, 2016 ; 2019).

Figure 1. Cartes Google du site d'échantillonnage. (a) République Démocratique du Congo, (b) Carte montrant la localisation de la ville de Kinshasa en République Démocratique du Congo, (c) Commune de Selembao, quartier Ngafani (Sites de prélèvement : FS1, FS2, PS1, PS2, PS3, PS4, PS5, PS6, PS7) et (d) Commune de Kimbanseke, quartier Esanga (Sites de prélèvement : FK1, FK2, FK3, PK1, PK2, PK3, PK4, PK5, SK1, SK2, SK3 et SK4).



2.2. Etude sur la gestion de l'eau et la prévalence des maladies d'origine hydrique

L'étude sur la gestion/utilisation de l'eau des puits et des sources ainsi que la prévalence des maladies hydriques dans les communes étudiées ont été réalisées durant la période 2016-2019, comme décrite par Kapembo *et al.* (2019). L'enquête consistait en des observations de terrain, des entretiens au moyen d'un questionnaire avec un échantillon de la population locale, des collaborateurs des institutions médicales et des gestionnaires des sources d'eau. Concernant la gestion/utilisation de la ressource en eau, un total de 200 ménages par quartier a été sélectionné afin d'obtenir des informations relatives au mode d'approvisionnement en eau par les usagers, à la localisation des latrines, à la gestion des puits et des sources, aux structures sociodémographiques et aux pratiques d'assainissement des usagers. Toutes les personnes interrogées (enfants et adultes) s'approvisionnent en eau dans les quartiers étudiés. L'étude a été réalisée auprès de deux groupes d'âge : 59% les moins de 15 ans (avec une fourchette d'âge de 9-15 ans et une moyenne de 13 ans) et 41% les plus de 15 ans (avec une fourchette d'âge de

16-35 ans et une moyenne de 23 ans). Parmi la population interrogée, 60% étaient des femmes et 40% des hommes. Quant à la prévalence des maladies hydriques (dont la fièvre typhoïde, la dysenterie amibienne, la filariose, la diarrhée, la gastro-entérite et le choléra) dans les ménages des communes étudiées, l'enquête a été effectuée sous forme de questionnaire auprès des institutions médicales locales retenues : 4 du quartier Ngafani (commune de Selembao) et 5 du quartier d'Esanga (commune de Kimbanseke).

2.3. Procédure d'échantillonnage de l'eau

L'échantillonnage de l'eau des puits et des sources s'est effectué en deux phases : pendant la saison sèche (mai-août, 2018) et (juin-septembre 2019), respectivement à Selembao (Quartier Ngafani) et à Kimbanseke (Quartier Esanga) ; et durant la saison des pluies (janvier-avril 2019) et (octobre-décembre 2019), respectivement dans les communes de Selembao et de Kimbanseke. Les échantillons ont été étiquetés comme suit (Fig. 1) : (i) Commune de Selembao : FS1-FS2 (Puits aménagés) ; PS1-PS7 (Puits non aménagés), et (ii) Commune de Kimbanseke : FK1-FK3 (Puits aménagés) ; PK1-PK5 (Puits non aménagés) ; SK1-SK4 (Sources). Les informa-

tions GPS des sites d'échantillonnage, la profondeur du niveau d'eau dans les puits ainsi que le nombre d'utilisateurs sont reportés dans le tableau 1. Pour ce qui est des puits aménagés, les échantillons d'eau ont été collectés directement dans les tuyaux de sortie. Quant aux puits non aménagés, l'eau a été collectée par un dispositif artisanal constitué

d'une bouteille en polyéthylène propre de 1 L attachée à une corde (Kapembo *et al.*, 2016). Pour les sources, enfin, l'eau a été collectée manuellement en trempant y directement un récipient en plastique polypropylène (500 mL). Une fois collectés, les échantillons ont été conservés dans une glacière et transportés au laboratoire pour analyse dans les 24 heures.

Tableau 1. Coordonnées GPS des puits et des sources d'eau, profondeur et nombre d'utilisateurs

Site d'échantillonnage	Longitude	Latitude	Profondeur du puit (m)		Couleur	N ^{bre} usagers	Année de construction
			Saison sèche	Saison de pluie			
FS1	15°17'11.2"	4°24'18.5"	22	-	Claire	± 1200	2019
FS2	15°17'09.3"	4°24'35.2"	35	-	Claire	± 2500	2018
FK1	15°22'58.0"	4°26'37.3"	40	-	Claire	± 2500	2015
FK2	15°22'03.7"	4°26'36.1"	28	-	Claire	± 1500	2016
FK3	15°22'07.1"	4°26'48.1"	30	-	Claire	±1000	2014
PS1	15°17'05.5"	4°24'1.2"	3	1	floue	± 200	2016
PS2	15°17'04.1"	4°24'03.8"	3	1.5	Claire	± 300	2017
PS3	15°17'00.8"	4°24'07.4"	5	3	Claire	± 300	2016
PS4	15°16'59.2"	4°24'12.4"	3	2	floue	± 100	2016
PS5	15°17'01.5"	4°24'27.4"	7	5	Claire	± 400	2017
PS6	15°17'01.9"	4°24'29.0"	3	2	Claire	± 200	2016
PS7	15°17'02.0"	4°24'29.4"	3	2	Claire	± 150	2017
PK1	15°22'01.8"	4°26'39.8"	5	5	Claire	± 50	2015
PK2	15°22'01.7"	4°26'39.6"	10	9	floue	± 80	2018
PK3	15°22'00.3"	4°26'37.8"	4	4	Soft	± 100	2016
PK4	15°22'04.4"	4°26'52.2"	8	7	Claire	± 80	2013
PK5	15°22'04.4"	4°26'48.1"	6	4	Claire	± 200	2019
SK1	15°22'26.6"	4°26'04.1"	1	1	Claire	+500	2017
SK2	15°22'19,1"	4°26'56,6"	1	1	Claire	± 500	2017
SK3	15°22'19.2"	4°26'56.1"	0.5	1	Claire	± 300	2018
SK4	15°22'08.7"	4°26'54.1"	0.8	1	floue	± 150	2018

FS1-FS2 (Puits aménagés) et PS1-PS7 (Puits non aménagés) du quartier Ngafani (Commune de Selembao).

FK1-FK3 (Puits aménagés), PK1-PK5 (Puits non aménagés) et SK1-SK4 (Sources) du quartier Esanga (Commune de Kimbanseke).

2.4. Analyse des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques, notamment la température (T), le pH, l'oxygène dissous (O₂) et la Conductivité Electrique (CE), ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un Multi 350i (WTW, Allemagne). La concentration en ions dissous (Na⁺, K⁺, PO₄³⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻) a été mesurée à l'aide d'une chromatographie ionique (Dionex ICS-3000, Canada) selon la

méthode décrite par Mavakala *et al.* (2016). Le matériau d'eau certifié (CRM, Ontario-99, Institut de recherche sur les eaux, Canada) a été utilisé pour vérifier la précision de l'instrument. Les résultats du CRM se situaient dans la plage d'acceptation indiquée sur le certificat du CRM.

2.5. Analyse des bactéries indicatrices de la pollution fécale dans les échantillons d'eau

Les bactéries indicatrices fécales [incluant *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterococcus* (ENT) et Coliformes totaux (TC)] ont été quantifiées dans les échantillons d'eau selon les méthodes standard internationales pour la détermination de la qualité de l'eau en utilisant la méthode de filtration sur membrane (APHA, 2005). En bref, pour chaque échantillon, des triplicatas de 100 mL d'eau ont été passés à travers un filtre de 0,45 mm (Sartorius stedim, biotech, Allemagne), puis placés sur différents milieux de culture sélectifs (Biolife, Italiana), en utilisant les conditions d'incubation suivantes :

- Pour l'analyse des bactéries *E. coli* : chaque échantillon d'eau a été inoculé dans un milieu Tryptone Soy Agar (TSA) et incubé à 37°C pendant 4 h, puis transféré dans un milieu Tryptone Bile X-Gluc Agar (TBX) à 44°C pendant 24 h ;
- Pour l'analyse des bactéries ENT : chaque échantillon d'eau a été inoculé dans le milieu Slanetz Bartley Agar (SBA) et incubé à 44°C pendant 48 h, puis transféré dans le milieu Bile Aesculin Agar (BAA) à 44°C pendant 4 h, et dans le milieu Endo Agar, incubé à 35° C pendant 24 h pour la CT.

Les résultats sont exprimés en unités formant colonies (UFC) pour 100 mL d'échantillon d'eau (UFC 100 mL⁻¹). La reproductibilité de l'ensemble des procédures expérimentales a été testée au moyen de triplicatas. Les contrôles sur le terrain et en laboratoire ont été effectués comme décrit dans nos études

précédentes (Nienie *et al.*, 2018 ; Kapembo *et al.*, 2016 ; Kilunga *et al.*, 2016).

2.6. Analyse statistique

Toutes les analyses d'échantillons d'eau ont été effectuées en triplicata pour chaque ensemble de conditions. En outre, trois répliques par dilution ont été réalisées pour la quantification du FIB afin d'établir l'écart type du comptage des colonies (Kayembe *et al.*, 2018 ainsi que APHA, AWWA et WEF, 2012). Le traitement statistique des données a été réalisé à l'aide de SigmaStat 11.0 (Systat Software, Inc.). Les données ont été soumises à un test de corrélation de rang de Spearman pour étudier les relations éventuelles à l'aide du logiciel statistique RStudio, version 1.3.1093, © 2009-2020 RStudio, PBC.

3. Résultats et discussion

3.1. Enquête sur la gestion des sources d'eau

D'après les observations et les mesures effectuées sur le terrain, la distance entre les points d'eau (puits et sources) et les habitations dans les deux municipalités varie considérablement, de 0 à 120 m. La distance entre les latrines et les puits est dans la plupart des cas comprise entre 0 et 10 m. Les puits et les sources aménagés sont les systèmes d'approvisionnement en eau les plus utilisés par les ménages, mais leur nombre est limité et ils sont également coûteux. Les puits constituent les sources d'eau préférées et accessibles pour plus de 80% des personnes étudiées. 41% de la population fournissant l'eau aux ménages sont des enfants de moins de 15 ans et 59% ont plus de 15 ans. 99% des enfants qui vont chercher l'eau au puits ne se lavent pas les mains avant de puiser l'eau après défécation. 100% des plus de 15 ans ne se lavent pas les mains avant de puiser l'eau et de déféquer. 6% des moins de 15 ans ont déjà déféqué près d'une source d'eau surtout pendant la saison des pluies. 80% des enfants de moins de 15 ans interrogés disent évaluer la potabilité de l'eau par sa couleur (incolore) et son odeur (inodore). 75% des enfants de moins de 15 ans admettent avoir eu la diarrhée ou des maux d'estomac juste après avoir bu cette eau,

en particulier l'eau provenant de puits et de sources non aménagés.

Figure 2. Quelques points d'échantillonnage (FS2, PS6, PS3) de la commune de Selembao et (PK6, SK3 et FK3) pour Kimbanseke (photos prises par M. Kapembo et F. Mukeba en octobre 2019).



3.2. Enquête épidémiologique associée aux maladies d'origine hydrique

Les données obtenues auprès des institutions médicales des communes de Selembao et Kimbanseke concernant la prévalence des maladies hydriques pour la période 2016-2019 sont rapportées dans le tableau 2. Ces données ne sont pas représentatives car la majorité des personnes ne se rendent pas dans les institutions médicales (sauf dans les cas graves) par manque de moyens financiers. Cependant, les données montrent une forte prévalence des maladies d'origine hydrique dans les quartiers Ngafani (Selembao) et Esanga (Kimbanseke). Par exemple, le quartier Ngafani (Selembao) est caractérisé par une forte prévalence de la fièvre typhoïde avec 782 et 880 cas en 2018 et 2019, respectivement. Le quartier Esanga (Kimbanseke) est caractérisé par une forte prévalence de la diarrhée avec 300, 279, 311 et 314 cas en 2016, 2017, 2018 et 2019, respectivement. D'autres cas de maladies associées à l'eau ne sont pas négligeables ; par exemple, 1117 et 325 cas de paludisme ont été remarqués dans le quartier Ngafani dans le courant des années 2017 et 2018, respecti-

vement. Alors que pour la gastro-entérite et la fièvre typhoïde, une forte augmentation est observée dans le quartier Ngafani, dans le quartier Esanga en revanche on observe une diminution annuelle du nombre des cas. Ceci peut probablement s'expliquer par l'amélioration de l'approvisionnement en eau, par une augmentation du nombre de sources et de puits aménagés (environ 40% des sources et puits sont aménagés (protégés) ou par un accès limité aux institutions médicales dans ce quartier.

La prévalence des maladies hydriques par groupe d'âge pour la période de juin-octobre 2018 dans le quartier Ngafani est présentée dans le tableau 3. Les résultats ont montré que le groupe d'âge inférieur à 15 ans est plus touché par les maladies hydriques. On peut remarquer qu'environ 59% de la population congolaise se situe dans la tranche d'âge 0-19 ans (MISC-RDC, 2010).

Tableau 2. Prévalence des maladies au cours de la période 2018-2019 dans les quartiers Ngafani (Selembao)^a et Esanga (Kimbanseke)^b.

Maladies	2016		2017		2018		2019	
	Ngafani	Esanga	Ngafani	Esanga	Ngafani	Esanga	Ngafani	Esanga
Fièvre typhoïde	38	6	ND	ND	782	4	880	8
Paludisme	6	16	1117	8	325	30	147	68
Dysenterie amibienne	2	9	20	28	20	13	9	26
Filariose	4	3	ND	7	ND	13	ND	7
Gastro-entérites	2	21	1	26	6	18	10	10
Cholera	1	1	0	1	0	6	2	3
Diarrhée	98	300	269	279	86	311	64	314

^a Source des données : *Formations médicales de Ngafani à Selembao, prises par Michel Kapembo en mars 2019.* ^b Source des données : *Formations médicales d'Esanga à Kimbanseke, prises par Florent Mukeba en mars 2019.*

ND : données non obtenues.

Plusieurs études menées dans un environnement similaire ont démontré que le manque d'accès à l'eau potable est la principale cause de l'émergence des maladies hydriques et a un impact sur la santé en provoquant des diarrhées infectieuses aiguës et des épisodes de diarrhée répétés ou chroniques (par exemple, Hunter *et al.*, 2010 ; Hulton *et al.*, 2007 ; Kouam, 2013). Prüss-Ustun et Carvalan (2006) ont démontré que le manque d'eau, d'assainissement et de système d'hygiène sont responsables de 29% des maladies diarrhéiques dans les pays en développement, principalement

dans les villes à population croissante. Fitzwater *et al.* (2011) ont noté qu'environ 88% des maladies diarrhéiques sont attribuées à la mauvaise qualité de l'eau et à l'hygiène.

Notre étude précédente (Kapembo *et al.*, 2019) a démontré que 61% des personnes quittant la commune suburbaine de Mont-Ngafula (Kinshasa) souffraient de maladies hydriques : diarrhée (11%) ; troubles gastro-entérites (7%) ; fièvre typhoïde (5%) ; dysenterie amibienne (5%) ; filariose (4%) et choléra (moins de 1%).

Tableau 3. Prévalence moyenne des maladies hydriques (selon la tranche d'âge) durant la période de Janvier à Octobre 2018 dans le quartier Ngafani^a.

Maladies	0-11 mois	1-4 ans	5-14 ans	> 15 ans	Moyenne
Paludisme	35,11	39,79	41,03	52,66	42,15
Fièvre typhoïde	1,77	2,33	6,55	8,85	4,88
Dysenterie amibienne	1,04	2,85	3,12	5,82	3,21
Gastro-entérites	1,32	0,99	0,74	0,89	0,99
Filariose	2,18	1,94	0,75	3,45	2,08
Diarrhée	3,50	2,97	2,15	2,32	2,74

^a Source des données : *Formations médicales de la commune de Selembao, relevées par M. Kapembo en février 2019.*

3.3. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

Les résultats des paramètres physico-chimiques de l'eau, y compris la température (T), le pH, la conductivité électrique (CE) et l'oxygène dissous (O₂) en fonction des variations sai-

sonnières sont rapportés dans le tableau 4. Les valeurs de T, pH et CE observées dans tous les sites d'échantillonnage, tant en saison sèche qu'en saison des pluies, se situent généralement dans les valeurs recommandées par les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé

pour la qualité de l'eau de boisson (OMS, 2011 ; 2017). La température de l'eau était plus élevée pendant la saison des pluies avec les valeurs maximales comprises entre 26,3-28,8 °C et plus faible pendant la saison sèche avec les valeurs comprises entre 23,9 et 26,9 °C. Le pH était compris entre 5,2-6,9 et 5,3-7,8 pendant les saisons sèches et pluvieuses, respectivement. La CE a considérablement varié selon les sites d'échantillonnage et les variations saisonnières. La valeur maximale de 704 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a été observée dans le site PK3 pendant la saison sèche et la valeur minimale de 24 $\mu\text{S cm}^{-1}$ dans PS5 pendant la saison des pluies. Ces valeurs sont comparables à celles d'autres études réalisées dans des environne-

ments similaires en zones tropicales (Amanial, 2015 ; Nienie *et al.*, 2017) et inférieures aux valeurs observées par Kapembo *et al.* (2016) dans des puits des communes de Bumbu (Kinshasa). Les valeurs d' O_2 étaient plus élevées dans les puits aménagés FK1-FK3 avec des valeurs comprises entre 4,1-5,0 et 5,1-6,8 mg L^{-1} pendant les saisons sèches et pluvieuses, respectivement. Ces valeurs sont conformes aux directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson (4-7 mg L^{-1}). A l'exception du site SK3 pendant la saison sèche avec la valeur de 4,9 mg L^{-1} , les autres sites d'échantillonnage présentent les valeurs les plus basses de O_2 comprises entre 1,1-3,6 mg L^{-1} .

Tableau 4. Paramètres physico-chimiques (température T, pH, Conductivité Electrique (CE) et oxygène dissous (O_2)) des échantillons d'eau provenant des puits et des sources pendant la saison sèche (Sèche) et la saison des pluies (Pluie).

Sites d'échantillonnage	T (°C)		pH		CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$)		O_2 (mg L^{-1})	
	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie
FS1	24,6	26,4	6,1	5,9	135	94	2,3	1,9
FS2	24,1	25,8	6,4	6,2	325	112	3,5	2,3
FK1	26,5	28,1	5,6	6,3	264	197	4,1	5,1
FK2	26,8	28,5	6,1	4,6	158	178	5,0	6,8
FK3	26,2	28,0	5,3	5,6	138	182	4,7	6,2
PS1	26,5	27,3	6,1	5,8	342	85	2,7	2,9
PS2	25,8	27,9	6,5	5,7	258	132	3,2	3,5
PS3	24,9	26,7	6,8	6,2	105	74	1,5	2,3
PS4	26,1	26,3	6,9	5,7	470	123	3,0	2,7
PS5	25,3	27,5	5,9	6,4	85	24	1,1	2,2
PS6	24,8	27,7	6,5	5,8	189	135	3,4	2,9
PS7	26,3	26,6	6,7	5,9	435	289	2,9	3,1
PK1	23,9	27,3	6,1	7,4	563	82	3,1	2,4
PK2	26,6	27,6	5,9	7,8	206	85	2,2	3,0
PK3	26,5	27,4	6,3	6,7	704	98	2,5	3,3
PK4	25,2	28,0	6,6	5,3	48	88	1,8	2,9
PK5	24,6	28,1	5,6	5,6	304	66	3,6	3,2
SK1	26,4	27,8	5,7	6,6	115	74	1,9	1,4
SK2	26,9	27,2	5,2	6,7	363	82	3,7	3,1
SK3	26,5	27,1	5,5	7,2	458	72	4,9	3,0
SK4	24,3	28,8	5,3	7,0	62	78	2,5	3,2
Normes de l'OMS*	12-25		6.5-9.5		200-800		4-6	

* Limite recommandée par les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé pour la qualité de l'eau de boisson (OMS, 2017). FS1-FS2 (Puits aménagés) et PS1-PS7 (Puits non aménagés) du quartier Ngafani (Commune de Selembao). FK1-FK3 (Puits aménagés), PK1-PK5 (Puits non aménagés) et SK1-SK4 (Sources) du quartier Esanga (commune de Kimbanseke).

Tableau 5. Concentration des ions solubles dans les échantillons d'eau provenant de puits et de sources pendant la saison sèche et la saison des pluies.

Sites d'échantillonnage	Na ⁺ (mg L ⁻¹)		K ⁺ (mg L ⁻¹)		PO ₄ ³⁻ (mg L ⁻¹)		SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)		NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)		NO ₂ ⁻ (mg L ⁻¹)	
	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie
FS1	92,61	36,42	5,46	2,37	0,09	0,01	103,24	78,66	6,33	8,52	0,01	0,01
FS2	78,56	58,90	4,88	2,19	0,83	0,07	94,32	19,45	1,32	12,40	0,01	0,01
FK1	98,34	60,11	7,53	2,34	0,71	0,35	132,12	77,66	7,32	10,52	0,01	0,01
FK2	103,20	51,14	8,52	3,17	0,88	0,62	215,32	141,27	5,41	9,06	0,01	0,01
FK3	99,6	52,8	8,59	6,4	0,56	0,37	145,89	85,9	6,25	11,3	0,02	0,02
PS1	28,64	17,44	8,50	6,11	0,01	0,02	128,15	31,01	25,48	72,17	0,02	0,09
PS2	19,77	11,50	4,23	2,89	0,12	0,03	24,75	12,43	9,55	16,24	0,01	0,04
PS3	31,01	24,35	2,89	3,56	1,04	0,07	9,07	6,06	9,98	10,12	0,02	0,05
PS4	27,22	12,84	6,11	7,55	0,94	0,02	12,02	4,75	21,52	65,80	0,05	0,15
PS5	44,10	31,50	4,99	2,93	0,45	0,02	7,88	6,55	12,56	24,58	0,01	0,01
PS6	9,96	10,11	7,37	3,19	0,78	0,04	11,23	7,88	28,01	31,04	0,06	0,09
PS7	52,44	42,31	10,47	7,51	1,03	0,02	20,05	12,92	1,38	9,78	0,01	0,05
PK1	39,86	23,44	2,92	0,66	0,38	0,01	77,77	23,44	38,09	74,14	0,03	0,99
PK2	7,91	2,14	3,64	1,04	0,54	0,33	139,44	101,03	43,61	83,11	0,77	1,02
PK3	78,81	69,56	3,14	1,19	0,95	0,99	134,11	76,15	29,16	35,09	0,01	0,03
PK4	10,22	8,77	2,06	0,99	0,09	0,01	111,09	45,22	32,53	75,12	0,02	0,07
PK5	32,73	21,17	3,71	1,24	0,71	0,03	13,65	8,91	7,90	28,41	0,02	0,07
SK1	53,41	32,11	8,32	4,22	0,32	0,21	49,33	22,45	2,30	7,45	0,01	0,01
SK2	18,76	6,58	2,34	0,39	0,98	0,99	200,03	64,49	47,84	68,24	0,01	0,87
SK3	27,12	3,33	6,45	2,22	0,56	0,12	99,05	45,08	4,58	10,17	0,01	0,04
SK4	22,53	9,99	3,56	1,18	1,15	0,55	88,26	42,14	31,15	59,44	0,01	0,96
Normes de l'OMS*	10-100	15	≤ 0,5	500	50	3	50	50	50	50	50	3

* Limite recommandée par les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé pour la qualité de l'eau de boisson (OMS, 2017). FS1-FS2 (Puits aménagés) et PS1-PS7 (Puits non aménagés) du quartier Ngafani

La concentration des ions solubles (Na⁺, K⁺, PO₄³⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻) dans les échantillons d'eau est rapportée dans le tableau 5. À l'exception du NO₃⁻ dans 7 sites (PS1, PS4, PK1, PK2, PK4, SK2, SK4) pendant la saison des pluies, la concentration des autres ions dans les échantillons d'eau de tous les sites étudiés est conforme aux recommandations de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson (OMS, 2017) pendant les saisons sèches et pluvieuses. Les puits aménagés présentent la plus faible concentration avec des valeurs

comprises entre 1,3-6,3 et 8,5-12,4 6 mg L⁻¹ pendant les saisons sèches et pluvieuses, respectivement. Dans les puits non aménagés, la concentration en NO₃⁻ a varié significativement selon les sites d'échantillonnage (P ≤ 0,05), avec les valeurs comprises entre 1,4-43,6 et 9,8-83,1 pendant les saisons sèches et pluvieuses, respectivement. La même tendance a été observée dans les sources avec des valeurs comprises entre 2,3-47,8 et 7,5-68,2 pendant les saisons sèches et pluvieuses, respectivement.

(Commune de Selembao). FK1-FK3 (puits aménagés), PK1-PK5 (puits non aménagés) et SK1-SK4 (sources) du quartier Esanga (commune de Kimbanseke).

Le niveau de nitrate dans les eaux souterraines et ses risques potentiels pour la santé humaine ont été discutés par plusieurs études récentes (Li *et al.*, 2021 ; Adimalla et Qiana, 2021). Le nitrate et ses composés sont naturellement présents dans l'environnement aquatique. Cependant, la concentration élevée de NO_3^- observée dans les eaux souterraines étudiées peut s'expliquer par plusieurs aspects, notamment l'infiltration d'eau provenant de l'agriculture urbaine utilisant des engrais, la perméabilité de la zone non saturée, la profondeur de l'aquifère, les fosses septiques non étanches et les systèmes d'assainissement non améliorés, ainsi que les excréments du bétail et les décharges non contrôlées à proximité des puits et des cours d'eau (Banks *et al.*, 2002 ; Balbus et Embrey, 2002 ; Abdelaziz *et al.*, 2007 ; Sacchi *et al.*, 2013 ; Kapembo *et al.*, 2016).

3.4. Qualité microbiologique de l'eau des puits et des sources

La qualité microbiologique des échantillons d'eau prélevés dans les puits et les sources pendant la saison des pluies et la saison sèche est présentée dans le tableau 5. Les niveaux

de FIB (*E. coli*, ENT et FC) dans les échantillons d'eau variaient significativement selon les sites d'échantillonnage et les variations saisonnières ($P < 0,05$). La pollution de l'eau était significativement plus élevée pendant la saison des pluies que durant la saison sèche. Dans les puits aménagés pendant la saison sèche, les valeurs moyennes (UFC 100 mL^{-1}) comprises entre 0-32, 0-48 et 0-19 ont été observées pour *E. coli*, ENT et TC, respectivement. Pendant la saison des pluies, les valeurs moyennes (UFC 100 mL^{-1}) variaient de 0-90, 0-89 et 0-38 pour *E. coli*, ENT et TC, respectivement (Tableau 6). De manière surprenante, aucune contamination fécale (présence d'*E. coli*, d'ENT et de TC) n'a été observée dans les échantillons d'eau prélevés dans 3 des 5 puits aménagés pendant les saisons sèche et pluvieuse. Ces résultats suggèrent l'absence totale de contamination fécale dans les puits (FS1, FK1 et FK3), ce qui indique que l'eau de ces puits peut être utilisée à des fins domestiques conformément à la réglementation de l'OMS sur l'eau potable concernant la qualité microbiologique (Eu, 2020 ; OMS, 2020). Ces puits ont été construits par des ONG et gérés par des particuliers (considérés comme des puits privés) moyennant une taxe d'approvisionnement en eau. Cela constitue un grand défi pour les utilisateurs à très faible revenu.

Tableau 6. Quantification moyenne d'*Escherichia coli*, d'*Enterococcus* et de coliformes totaux dans les puits et les sources d'eau pendant la saison sèche et la saison des pluies.

Sites d'échantillonnage	<i>E. Coli</i> (UFC ± SD x 10 ² 100 mL ⁻¹)		ENT (UFC ± SD x 10 ² 100 mL ⁻¹)		TC (UFC ± SD x 10 ³ 100 mL ⁻¹)		
	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	Sèche	Pluie	
Puits aménagés	FS1	0	0	0	0	0	0
	FS2	0,32 ± 0,03	0,90 ± 0,35	0,48 ± 0,09	0,89 ± 0,12	0,19 ± 0,04	0,38 ± 0,11
	FK1	0	0	0	0	0	0
	FK2	0	0,03 ± 0,00	0	0,05 ± 0,00	0	0,09 ± 0,02
	FK3	0	0	0	0	0	0
Puits non aménagés	PS1	2,21 ± 0,18	20,01 ± 1,12	9,08 ± 1,31	28,01 ± 2,21	11,04 ± 1,04	35,30 ± 3,51
	PS2	0,03 ± 0,02	0,21 ± 0,06	0,11 ± 0,09	0,98 ± 0,15	0,09 ± 0,01	0,64 ± 0,05
	PS3	0,41 ± 0,07	0,81 ± 0,15	0,12 ± 0,03	1,12 ± 0,06	0,17 ± 0,02	0,31 ± 0,05
	PS4	11,21 ± 0,05	19,31 ± 1,22	22,10 ± 0,51	16,11 ± 1,22	35,12 ± 3,97	79,12 ± 3,77
	PS5	0,09 ± 0,01	0,03 ± 0,00	0,12 ± 0,08	0,19 ± 0,03	0,17 ± 0,06	0,29 ± 0,07
	PS6	7,03 ± 0,39	29,07 ± 8,25	8,31 ± 2,51	10,52 ± 1,75	2,83 ± 0,32	14,32 ± 2,13
	PS7	3,11 ± 0,12	24,06 ± 3,18	6,03 ± 1,15	28,13 ± 2,59	7,06 ± 1,48	13,42 ± 6,04
	PK1	2,43 ± 0,35	12,08 ± 0,77	3,13 ± 0,77	15,18 ± 7,16	2,03 ± 0,04	17,22 ± 6,12
	PK2	7,33 ± 1,11	29,36 ± 2,14	6,99 ± 2,01	16,10 ± 2,44	38,04 ± 2,17	79,03 ± 8,33
	PK3	2,63 ± 0,44	29,36 ± 2,14	1,98 ± 0,22	32,08 ± 1,11	3,20 ± 0,18	19,03 ± 3,33
PK4	3,55 ± 0,99	22,44 ± 3,11	3,96 ± 1,02	43,10 ± 2,22	7,18 ± 0,92	14,99 ± 4,15	
PK5	1,42 ± 0,13	45,12 ± 3,22	1,12 ± 0,25	56,29 ± 4,13	1,32 ± 0,81	24,44 ± 3,11	
Sources	SK1	0	0,03 ± 0,00	0	0,08 ± 0,01	0	0,07 ± 0,02
	SK2	2,55 ± 0,33	4,37 ± 1,08	2,69 ± 0,47	8,15 ± 1,09	9,06 ± 1,75	10,03 ± 3,37
	SK3	0,06 ± 0,01	0,90 ± 0,13	0,04 ± 0,00	0,78 ± 0,17	0,08 ± 0,01	0,24 ± 0,01
	SK4	4,32 ± 0,76	6,50 ± 0,92	3,35 ± 0,18	9,88 ± 1,03	1,13 ± 0,04	7,11 ± 2,13
UE/OMS*	0		0		0		

* Normes de l'UE et de l'Organisation Mondiale de la Santé pour la qualité de l'eau de boisson 0 UFC 100 mL⁻¹, pour *E. coli*, ENT et TC (UE, 2020 ; OMS, 2020).

E. coli : *Escherichia coli* ; ENT : *Enterococcus* ; TC : Coliformes totaux ; ± SD : Écart-type.

Pour les puits et les sources non aménagés, la qualité microbiologique des échantillons d'eau était très mauvaise en saison sèche et en saison des pluies, et variait significativement selon les sites d'échantillonnage et les variations saisonnières ($P < 0,05$). Les valeurs moyennes du FIB pendant la saison sèche étaient comprises entre (0,03-11) x 10², (0,11-22) x 10², et (0,09-38) x 10² UFC 100 mL⁻¹ pour *E. coli*, ENT, et TC, respectivement. Pendant la saison des pluies, les valeurs moyennes variaient de (0,03-45) x 10², (0,19-56) x 10², et (0,29-79) x 10² UFC 100 mL⁻¹ pour *E. coli*, ENT, et TC, respectivement. Ces résultats indiquent que les échan-

tilons d'eau de tous les puits et sources étudiés sont fortement pollués par les FIB et ne répondent pas aux directives de l'OMS pour l'eau à usage domestique, qui recommande 0 UFC 100 mL⁻¹ pour *E. coli*, ENT et TC (Eu, 2020 ; OMS, 2020). La qualité microbiologique de l'eau des sources était également mauvaise, principalement pendant la saison des pluies. Les valeurs moyennes du FIB variaient de 0-432, 0-335 et 0-113 UFC 100 mL⁻¹ pour *E. coli*, ENT et TC, respectivement. Pendant la saison des pluies, les valeurs moyennes (UFC 100 mL⁻¹) ont varié de 3-650, 8-988 et 7-1000 pour *E. coli*, ENT et TC, respectivement. Il est intéres-

sant de noter qu'aucune présence de FIB (*E. coli*, ENT, TC) dans les échantillons d'eau de la source SK1 prélevés pendant la saison sèche n'a été observée, ce qui suggère l'absence totale de contamination fécale de l'eau conformément à la réglementation sur l'eau potable (Eu, 2020 ; OMS, 2020). En effet, une étude précédente réalisée par les autres auteurs dans un environnement similaire (Kikwit, RDC) a indiqué que certains puits et cours d'eau ne sont pas contaminés par les FIB pendant la saison sèche (Nienie *et al.*, 2017). Ces auteurs ont conclu que les précipitations dans les zones tropicales sont d'une grande intensité et emportent les sols contaminés des bassins versants qui, à leur tour, contaminent les ruisseaux, les rivières et les puits avec des matières fécales pendant la saison des pluies.

Les résultats de cette étude ont démontré que l'analyse microbiologique des échantillons d'eau provenant de 100% des puits et des sources non gérés/non aménagés (à l'exception de la source KS1 pendant la saison sèche) sont fortement contaminés par des matières fécales. Par conséquent, l'eau provenant de ces sources est susceptible de contenir des organismes pathogènes responsables de maladies

liées à l'eau telles que les maladies gastro-intestinales, la typhoïde, le choléra et d'autres maladies diarrhéiques (UE, 2020 ; OMS, 2011 ; US EPA, 2000 ; Haile *et al.*, 1999 ; Noble *et al.* 2004 ; Davis *et al.*, 2005). La détérioration de la qualité microbiologique de l'eau (principalement pendant la saison des pluies) peut s'expliquer par plusieurs causes, notamment l'absence d'installations sanitaires (y compris la défécation en plein air et la distance entre les toilettes et les sources d'eau), la percolation des sols de surface contaminés pendant les événements pluvieux, l'infiltration des toilettes situées près des puits et des sources, et la contamination directe par les utilisateurs.

3.5. Corrélation statistique

La corrélation de Spearman a été effectuée pour identifier les relations possibles entre les paramètres analysés. Les résultats de l'analyse des données sont présentés dans les tableaux 7 et 8, pour les saisons des pluies et sèches, respectivement. En général, aucune corrélation significative n'a été observée entre les paramètres physicochimiques et les paramètres bactériologiques (*E. coli*, ENT, TC) pendant les saisons des pluies et sèches.

Tableau 7. Corrélation d'ordre de Spearman des paramètres^a sélectionnés dans l'eau des puits analysée en saison des pluies.

	T°C	pH	CE	O ₂	Na ⁺	K ⁺	PO ₄ ³⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	<i>E. coli</i>	ENT	TC
T°C		-0,102	-0,020	0,518	-0,130	-0,620	-0,090	-0,186	0,103	0,175	0,077	0,125	-0,166
pH			-0,399	-0,427	-0,332	-0,321	0,332	0,270	0,322	0,670	-0,007	-0,139	0,206
CE				0,555	0,388	0,388	-0,180	0,001	-0,354	-0,259	0,005	-0,046	-0,083
O ₂					0,362	-0,221	-0,052	0,064	-0,196	-0,127	-0,134	-0,120	-0,148
Na ⁺						0,159	0,267	0,318	-0,557	-0,464	-0,210	-0,153	-0,384
K ⁺							-0,341	-0,231	-0,247	-0,459	-0,045	-0,092	0,180
PO ₄ ³⁺								0,6131	0,113	0,318	-0,067	-0,070	-0,070
SO ₄ ²⁻									-0,005	0,147	-0,177	-0,191	-0,014
NO ₃ ⁻										0,706	0,450	0,451	0,679
NO ₂ ⁻											0,122	0,039	0,369
<i>E. coli</i>												0,880	0,602
ENT													0,705

^a Les paramètres comprennent les paramètres physicochimiques (pH, température (T°C), conductivité électrique (EC), oxygène dissous (O₂) et ions solubles (Na⁺, K⁺, PO₄³⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ et NO₂⁻) et les bactéries indicatrices fécales (FIB) : *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterococcus* (ENT), et Coliformes totaux (CT). Les coefficients significatifs (p<0,05) sont en gras.

Tableau 8. Corrélations d'ordre de Spearman des paramètres^a sélectionnés dans l'eau du puits peu profond analysée en saison sèche.

	T°C	pH	CE	O ₂	Na ⁺	K ⁺	PO ₄ ³⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	<i>E. coli</i>	ENT	TC
T°C		-0,185	0,190	0,291	0,002	0,094	-0,099	0,170	0,052	0,193	0,032	0,129	0,315
pH			0,149	-0,358	-0,120	0,120	0,014	-0,407	-0,097	-0,027	0,338	0,433	0,233
CE				0,271	0,056	0,000	0,102	0,067	0,121	-0,074	0,193	0,278	0,181
O ₂					0,287	0,1591	0,044	0,197	-0,259	-0,177	-0,157	-0,102	-0,173
Na ⁺						0,430	0,073	0,387	-0,551	-0,305	-0,527	-0,413	-0,412
K ⁺							-0,023	-0,002	-0,524	-0,168	-0,112	0,110	-0,089
PO ₄ ³⁺								-0,008	0,009	-0,048	0,269	0,140	0,065
SO ₄ ²⁻									0,299	0,157	-0,192	-0,233	0,028
NO ₃ ⁻										0,692	0,593	0,353	0,635
NO ₂ ⁻											0,437	0,219	0,715
<i>E. coli</i>												0,902	0,812
ENT													0,785
TC													

Les paramètres comprennent les paramètres physico-chimiques (pH, température (T°C), Conductivité Electrique (CE), Oxygène dissous (O₂) et ions solubles (Na⁺, K⁺, PO₄³⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻ et NO₂⁻) et les bactéries indicatrices fécales (FIB) : *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterococcus* (ENT), et Coliformes totaux (CT). Les coefficients significatifs (p<0,05) sont en gras.

Ces résultats suggèrent que les paramètres physico-chimiques et bactériologiques peuvent être considérés comme provenant de sources différentes. Cependant, une forte corrélation mutuellement positive a été observée entre *E. coli*, ENT et TC pendant la saison des pluies et la saison sèche ; par exemple, pendant la saison des pluies (Tableau 7) : *E. coli* et ENT (R= 0,88, P < 0,001), et pendant la saison sèche (Tableau 8) : *E. coli*, ENT et TC (0,82<R<0,90, P < 0,05), ENT et TC (R= 0,79, P > 0,05). Ces résultats indiquent que *E. coli*, ENT et TC pourraient provenir de sources communes et être transportés dans les puits par des transporteurs communs (Haller *et al.*, 2009 ; Poté *et al.*, 2008 ; Kilunga *et al.*, 2016). La même tendance a été observée dans nos études précédentes réalisées dans un environnement similaire (Nienie *et al.*, 2017 ; Kapembo *et al.*, 2016 ; 2019).

Conclusion

Dans cette investigation, nous avons étudié les variations saisonnières des paramètres phy-

sico-chimiques et des niveaux de FIB dans l'eau de boisson collectée dans les puits et les sources d'eau des communes suburbaines de Selembao et de Kimbanseke, dans la ville de Kinshasa en RDC. A notre connaissance, il s'agit de la première étude du genre évaluant la contamination des puits et des sources par des matières fécales humaines dans ces municipalités. Plus de 80% de l'approvisionnement en eau domestique dans ces entités de type communal proviennent des sources étudiées (puits et sources). Les résultats ont révélé qu'à l'exception de NO₃⁻ dans 7 des 21 sources d'eau examinées pendant la saison des pluies, la concentration des autres ions étudiés est conforme aux directives de l'OMS pour la qualité de l'eau de boisson pendant les saisons sèches et pluvieuses. Quant à l'analyse bactériologique, elle révèle que 60% (3 puits aménagés sur 5) ne sont pas contaminés par des matières fécales pendant les saisons sèches et des pluies. Les puits aménagés représentent moins de 15% des sources d'approvisionnement en eau dans les municipalités de Selembao et de Kimbanseke. Au contraire, 100% des puits non aménagés sont fortement contaminés par des matières fécales pendant les saisons sèches et pluvieuses.

Les échantillons d'eau provenant des sources étudiées (à l'exception d'une source pendant la saison sèche) présentent une forte contamination par des matières fécales pendant les saisons sèches et pluvieuses.

En fait, selon les réglementations de l'OMS sur l'eau potable, l'eau de plusieurs des sources étudiées n'est pas appropriée pour la boisson ou d'autres usages domestiques. La contamination des sources d'eau par des micro-organismes constitue un risque important pour la santé publique en raison des dangers qu'ils représentent pour les humains par leur consommation. Ces résultats corroborent notre enquête épidémiologique qui indique l'apparition et la persistance de maladies d'origine hydrique dans les municipalités étudiées. L'absence de systèmes et de services d'assainissement gérés de manière adéquate et d'hygiène combinée au manque de protection des points d'eau sont donc au moins responsables de la contamination des sources d'eau par les fèces humaines, et de l'apparition de maladies hydriques dans les zones étudiées. Les résultats de cette étude appellent donc à un effort urgent vers la réduction de la contamination des sources d'eau par les fèces humaines, tout en maintenant une surveillance épidémiologique et de laboratoire sur la qualité des sources pour informer et protéger la population.

Remerciements

Cette recherche est le fruit de la collaboration entre l'Université de Genève (Département F.-A. Forel), l'Université de Kinshasa, l'Université Nationale Pédagogique et le Centre de Recherche en Sciences Humaines en République Démocratique du Congo, à travers le «Programme de Renforcement des Capacités de l'Enseignement et de la Recherche en Sciences de l'Environnement «PRCERSE». Les auteurs remercient le Fond National Suisse de la Recherche Scientifique pour son soutien financier.

Respect des normes éthiques

Les études de terrain n'ont pas impliqué d'espèces menacées et protégées. Les financeurs n'ont joué aucun rôle dans la conception de l'étude, la collecte et l'analyse des données, la décision de publier ni dans la préparation du manuscrit.

Conflit d'intérêt

Aucun conflit d'intérêt n'a été mentionné par les auteurs.

Références bibliographiques

- Abdelaziz, S., Fredj, C., Foued, S., Sâadi, A. (2007). Hydrologie et qualité des eaux de la nappe de Grombalia (Tunisie Nord-Orientale). *Sciences et changements planétaires. Sécheresse*. Vol 15, N°2, 159-166.
- Adimalla, N., Qiana, H. (2021). Groundwater chemistry, distribution and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater: A case study from the semi-urban region of South India. *Ecotox Environm Safety* 207, 111277.
- Aghzar, N., Berdai, H., Bellouti, A., Soudi, B. (2002). Pollution nitrique des eaux souterraines de Tadla (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau / Journal of Water Science*. Vol. 15, N°2. PP. 459-492.
- APHA, AWWA, WEF. Part 9000: Microbial examination. In *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*; Rice, E. W.; Baird, R. B.; Eaton, A. D.; and Clesceri, L. S., Eds.; American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF): Washington, DC, 2012.
- Amanial, H.R. (2015) Assessment of Physico-chemical Quality of Spring Water in Arbaminch, Ethiopia. *J Environ Anal Chem* 2:157. doi:10.4172/2380.
- Aquaref, 2011. Guide des prescriptions techniques pour la surveillance physico-chimique des milieux aquatiques.

- Balbus, J. M., Embrey, M. A. (2002). Risk Factors for Waterborne Enteric Infections. *Curr. Opin. Gastroenterol*, 18, 46–50.
- Ballester, F., Sunyer, J. (2000). Drinking water and Gastrointestinal and improvement, need of better understand and an improvement in public health surveillance. *Journal of Epidemiology Community health* 54:3-5
- Banks, D.; Karnachuk, O. V.; Parnachev, V. P.; Holden, W.; Frengstad, B. (2002). Groundwater Contamination from Rural Pit Latrines: Examples from Siberia and Kosova. *Water Environ. J.* 16, 147–152. DOI : 10.1111/j.1747-6593.2002.tb00386.x.
- Ben Kabour, B., Zouhri, L. (2005). Caractérisation hydrochimique et bactériologique des eaux souterraines : bordure méridionale du bassin du Rharb (Maroc). *Hydrological sciences journal*. Vol 50, N°6, PP. 1137-1149.
- Davis, K., Anderson, M.A., Yates, M.V. (2005). Distribution of indicator bacteria in Canyon Lake, California. *Water Research* 39, 1277-1288.
- EL Asslouj, J., Kholtei, S., EL Amrani-Paaza, N., Hilali, A. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 20, N°3. PP. 309-321.
- Eu (European Council of the European Union), 2020. Safe and clean drinking water: Council adopts strict minimum quality standards, press release, 23 October 2020. Brussel, Belgium.
- Fitzwater, S., Chandran, A., Kosek, M., Santosham, M. (2011). Infectious diarrhea. In Selendy Jeanine M.H. *water and sanitation-related diseases and the environment*. Singapour, Edition wiley Blackwell, pp 497.
- Goldscheider, N.N., Haller, L.L., Wildi, W., Zopfi, J.J., Poté, J. (2007). Characterizing water circulation and contaminant transport in lake Geneva using bacteriophage tracer experiments and limnological Environ;sci;Technol; 41(15), 5252-5258.
- Graham, J.P., Polizzotto, M.L. (2013). Pit Latrines and Their Impacts on Groundwater Quality: A Systematic Review. *Environ. Health Perspect.* 121, 521–530. DOI: 10.1289/ehp.1206028.
- Gunthen, F., Graun. (1992). Waterborne disease outbreaks in the USA causes and Prevention. 245.0.92 WA. *Rapp. Trimest. Statist. Sanit. Mond.* 45
- Haile, R.W., Witte, J.S., Gold, M., Cressey, R., McGee, C., Millikan, R.C., Glasser, A., Harawa, N., Ervin, C., Harmon, P., Harper, J., Dermand, J., Alamillo, J., Barrett, K., Nides, M., Wang, G.-Y. (1999). The Health Effects of Swimming in Ocean Water Contaminated by Storm Drain Runoff. *Epidemiology* 10, 355-363.
- Haller, L., Amedegnato, E., Pote, J., Wildi, W. (2009). Influence of Freshwater Sediment Characteristics on Persistence of Fecal Indicator Bacteria. *Water. Air Soil Pollut.* 203, 217–227. DOI: 10.1007/s11270-009-0005-0
- Hassoune, E.M., Bouzidi, A., Koulali, Y., Hadarbach, D. (2006). Effets des rejets liquides domestiques et industriels sur la qualité des eaux souterraines au nord de la ville de Settat (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie*, n°28, 61-71.
- Hulton, G., Haller, L., Bartram. (2007). Economic and Health effects on increasing coverage of low cost household drinking-water supply and sanitation interventions to countries off-track to meet MDG target 10. Geneva, Switzerland, World Health Organisation (Public Health and the Environment) XIII, report n° WHO/SDE/WSH/07/05
- Hunter, P.R.; MacDonald, A.M., Carter, R.C. (2010). Water Supply and Health. *PLoS Med.* 7^c 1000361. DOI: 10.1371/ journal.pmed.1000361.
- Kapembo, M.L., Dhafer, M.M., Thevenon, F., Laffite, A., Bokolo, K.M., Mulaji, K.C.,

- Mpiana T.P., Poté, J. (2019): Prevalence of water-related diseases and groundwater (drinking-water) contamination in the suburban municipality of Mont Ngafula, Kinshasa (Democratic Republic of the Congo), *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, DOI: 10.1080/10934529.2019.1596702
- Kapembo, M.L., Laffite, A., Bokolo, M.K., Mbangwa, A.L., Maya-Vangua, M.M., Otamonga, J.-P., Mulaji, C.K., Mpiana, P. T., Wildi, W., Pote, J. (2016). Evaluation of Water Quality from Suburban Shallow Wells under Tropical Conditions according to the Seasonal Variation, *Bumbu, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. Expo. Health*, 8, 487–496. DOI: 10.1007/s12403-016-0213-y.
- Kayembe, J.M., Thevenon, F., Laffite, A., Sivalingam, P., Ngelinkoto, P., Mulaji, C. K., Otamonga, J.-P., Mubedi, J.I., Pote, J. (2018). High Levels of Faecal Contamination in Drinking Groundwater and Recreational Water Due to Poor Sanitation, in the Sub-Rural Neighbourhoods of Kinshasa, Democratic Republic of the Congo. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 221, 400–408. DOI: 10.1016/j.ijheh.2018.01.003.
- Kilunga, P.I., Kayembe, J. M., Laffite, A., Thevenon, F., Devarajan, N., Mulaji, C. K., Mubedi, J. I., Yav, Z. G., Otamonga, J.-P., Mpiana, P. T., Pote, J. (2016). The Impact of Hospital and Urban Wastewaters on the Bacteriological Contamination of the Water Resources in Kinshasa, Democratic Republic of Congo. *J. Environ. Sci.*, 51, 1034–1042. DOI: 10.1080/10934529.2016.1198619.
- Kouam, K.G.R. (2013). Vers une gestion rationnelle de l'eau dans une situation complexe d'urbanisation anarchique dans un Pays en Développement : Cas du bassin versant de l'abieague (Yaoundé-Cameroun). Thèse de doctorat 2013.
- Lafferriere, M., Minville, J.-J., Lavoie, J., Payment, P. (1996). L'industrie Porcine et Les Risques Reliés à la Santé Humaine. *Bull. Inform. Santé. Environ. Quebec*, 7, 1–4.
- Landreau, L. (1990). Pollution des Eaux par les Nitrates. *Eau et Dev.* 7, 1–4.
- Li, Y., Zhai, Y., Lei, Y., *et al.* (2021). Spatiotemporal evolution of groundwater nitrate nitrogen levels and potential human health risks in the Songnen Plain, Northeast China. *Ecotox Environm Safety*, 208, 111524.
- Longo N.J., (2009). Apport des Outils Hydrographiques et Isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont-Amba, Thèse, France, Université d'Avignon, 46-75P
- Makoutode, M., Assani, A.K., Ouendo, E-M., Agueh, V. D., Diallo, P. (1999). Qualité et mode de gestion de l'eau de puits en milieu rural au Benin : cas de la Sous-préfecture de Grand-Popo. *Médecine d'Afrique Noire*, 46 (11). PP 474-478.
- Mavakala, B.K., Le Faucheur, S., Mulaji, C. K., Laffite, A., Devarajan, N., Biey, E. M., Giuliani, G., Otamonga, J.-P., Kabatusuila, P., Mpiana, P. T., Pote, W.J. (2016). Leachates Draining from Controlled Municipal Solid Waste Landfill: Detailed Geochemical Characterization and Toxicity Tests. *Waste Manage.* 55. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.04.028.
- Mbawala, A., Abdon, Ngassoum, M.B. (2010). Evaluation de la pollution physico-chimique et microbienne des eaux de puits de Deng ; Ngaomdre (Camèroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(6):1692-1975
- MISC-RDC. (2010). UNICEF. Enquête par grappe à indicateurs multiples en République Démocratique du Congo. Rapport Final Mai 2011, 2011.
- Montgomery, M.A., Elimelech, M. (2007). Water and sanitation in developing countries including health on the equation. *Environmental science and technology* 41, 17-24
- Moukolo, N., Gaye, Becaye, C. (2001). Problèmes de contamination des nappes phréatiques par les rejets domestiques dans les métropoles d'Afrique Noire. Cas de la nappe de Brazzaville au Congo. *Sciences et changements planétaires, Sécheresse.* 12 (3), 175-

- Nienie, A. B., Sivalingam, P., Laffite, A., Nge-linkoto, P., Otamonga, J.-P., Matand, A., Mulaji, C. K., Biey, E.M., Mpiana, P.T., Pote, J. (2017). Microbiological Quality of Water in a City with Persistent and Recurrent Waterborne Diseases under Tropical Sub-Rural Conditions: The Case of Kikwit City, Democratic Republic of the Congo. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 220, 820–828. DOI: 10.1007/s11270-009-0005-0.
- Nnadi, F.N., Fulkerson, M. (2002). Assessment of Groundwater under Direct Influence of Surface Water. *J. Environ. Sci.*, 37, 1209–1222. DOI: 10.1081/ESE-120005981.
- Noble, R.T., Leecaster, M.K., McGee, C. D., Weisberg, S. B., Ritter, K. (2004). Comparison of Bacterial Indicator Analysis Methods in Stormwater-Affected Coastal Waters. *Water Res.*, 38, 1183–1188. DOI: 10.1016/j.watres.2003.11.038.
- Poté, J., Haller, L., Kottelat, R., Sastre, V., Arpagaus, P., Wildi, W. (2009). Persistence and Growth of Faecal Culturable Bacterial Indicators in Water Column and Sediments of Vidy Bay, Lake Geneva, Switzerland. *J. Environ. Sci.*, 21, 62–69. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60012-7.
- Prüss-Ustun A. Carvalan C. (2006). Preventing disease through healthy environments towards an estimate of the environmental burden of disease. WHO Geneva (Suisse).
- Sacchi, E., Acutis, M., Bartoli, M., Brenna, S., Delconte, C.A., Laini, A. et Pennisi, M. (2013). Origin and fate of nitrates in groundwater from the central Po plain: Insights from isotopic investigations. *Applied Geochemistry* 34, 164-180.
- Suzuki, Y.; Kanda, N.; Furukawa, T. (2012). Abundance of *Enterococcus* Species, *Enterococcus faecalis* and *Enterococcus faecium*, Essential Indicators of Fecal Pollution, in River Water. *J. Environ. Sci.*, 47, 1500–1505. DOI: 10.1080/10934529.2012.680315.
- Thevenon, F., Regier, N., Benagli, C., Tonolla, M., Adatte, T., Wildi, W., Poté, J. (2012). Characterization of Faecal Indicator Bacteria in sediments cores from the largest freshwater lake of Western Europe (Lake Geneva, Switzerland). *Ecotoxicol Environ. Safety* 78, 50-56.
- UNESCO, (2007). Water portal newsletter no. 161. Water Related Diseases.
- UNICEF, (2010). “ Le paludisme tue encore “
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2011). Emerging issues in our global environment: postconflict environmental assessment in Democratic Republic of the Congo. Synthesis for Policy Makers (United Nations Environment Programme)
- US EPA (United States Environmental Protection Agency), 2000. Health effects criteria for fresh recreational waters (U.S. Environmental Protection Agency).
- OMS. (2011). Guidelines for Drinking-Water Quality, 4th ed.; Geneva, Switzerland: WHO, 2011.
- OMS. (2017). Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum; WHO: Geneva, Switzerland, 2017.
- OMS. (1997). Guidelines for Drinking Water Quality, vol. 3, seconded. Surveillance and Control of Community Supplies.
- OMS. (2019). WHO World Water Day Report - World Health Organization. Geneva, Switzerland. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
- Yard, E. E.; Murphy, M. W.; Schneeberger, C.; Narayanan, J.; Hoo, E.; Freiman, A.; Lewis, L. S. et Hill, V. R. (2011). *Microbial and Chemical Contamination during and after Flooding in the Ohio River-Kentucky*. *J. Environ. Sci. Health A Toxicol. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 2014, 49, 1236–1243. DOI: 10.1080/10934529.2014.910036.