

Évaluation de la qualité des eaux de puits et de rivière, utilisées par certaines populations de la ville de Libreville au Gabon: Cas du quartier Nzeng-Ayong Dragages

[Assessing of water quality of wells and river used by Gabonese people in Libreville's town: Case of Nzeng-Ayong Dragages district]

Yvon-bert Pambou¹, Alice Mikolo Ep. Banaka¹, Emelie Arlette Apinda Legnouo¹, Nadine Ngayila Ep. Goa¹, Annie Marcelle Massolou¹, and Alfred Ngomanda²

¹Institut de Recherche en Écologie Tropicale, Département des Écosystèmes Aquatiques, Unité de Recherche en Eau et Environnement, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (IRET, CENAREST), BP 13345 Quartier Gros-bouquet, Libreville, Gabon

²Institut de Recherche en Écologie Tropicale, Département de Biologie et Écologie Végétales, Unité de Recherche en Végétaux et Plantes ornementales, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (IRET, CENAREST), BP 13345 Quartier Gros-bouquet, Libreville, Gabon

Copyright © 2020 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Drinking water remains a scarce resource in many African countries. The quality of water comes from wells/river was studied through the global parameters (Temperature, T; Potential of hydrogen, pH; Electrical conductivity, EC; Dissolved oxygen, O₂ diss; Total Suspended Solids, TSS; Salinity, NaCl; and ionic species, Xⁿ). The samples were collected during wet season, in four wells and the river of Nzeng-Ayong Dragages district (Libreville, Gabon). Physical parameters (T, pH, EC and O₂) were evaluated in situ, using a multi-parameter device (420-SET-G). TSS were determined after the dewatering step of the raw sample in a filtration cell equipped with a 0,45 µm filter membrane, and Salinity, estimated by colorimetric titration. Finally, mineral pollutants such as (Ba²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻) and total iron (Fe²⁺, Fe³⁺) were evaluated by spectrophotometry, Hach DR 3900. Results show that, the average pH of wells' water is close to 6.18±1.32 (acid water) while that pH of water from river is neutral (7.23±0.12). EC and dissolved O₂ of wells are respectively 184.20±15.78 µS/cm and 8.93±0.97 mg O₂/L whereas in the river the values are 37.98±0.85 µS/cm and 7.57±0.39 mg d'O₂/L. The ion analysis shows that the two resources are almost not polluted by chemical species other than Ba²⁺ and PO₄³⁻. Pollution ranging between 4.75±1.71 and 4.33±1.15 mg/L of Ba²⁺, then between 1.31±1.13 and 2.77±2.07 mg/L of PO₄³⁻ for wells and river, which the concentration is above of the maximum required (0.7 mg/L of Ba²⁺ and 2 mg/L of PO₄³⁻). The structure of soil and the anthropogenic releases could be explaining this alteration. Finally, household bleach treatment has a benefit effect on the reduction of the pollution, with the exception of TSS and Nitrates. This study will be extended to other sites and supplemented by microbiological tests, in order to map areas at risk.

KEYWORDS: Water from wells, water from river, physico-chemical parameters, district of Nzeng-Ayong Dragages, Libreville Gabon.

RESUME: L'accès à l'eau potable demeure encore un luxe dans beaucoup de pays d'Afrique. La qualité des eaux de puits/rievère a été étudiée à travers les paramètres globaux (Température, T; Potentiel d'hydrogène, pH; Conductivité électrique, CE; Oxygène dissous, O₂ diss; Matières en Suspension, MES; Salinité, NaCl; et Métaux, Xⁿ). Les échantillons ont été collectés en saison de pluie, au niveau de quatre puits et du cours d'eau intra-muros au quartier Nzeng-Ayong Dragages (Libreville, Gabon). Les paramètres physiques (T, pH, CE et O₂) sont évalués in situ, au moyen d'un multi-paramètre portable (420-SET-G). Les MES sont déterminées après déshydratation de l'échantillon brut dans une cellule de filtration équipée d'un filtre de porosité 0,45

μm , et la Salinité, estimée par dosage colorimétrique. Enfin, les polluants minéraux (Ba^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) et le fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}) sont évalués par spectrophotométrie, Hach DR 3900. Les résultats montrent que le pH moyen de l'eau de puits est voisin de $6,18 \pm 1,32$ (eau acide) tandis que celui de l'eau de rivière est neutre ($7,23 \pm 0,12$). La CE et l' O_2 dissous de l'eau des puits sont respectivement de $184,20 \pm 15,78 \mu\text{S/cm}$ et $8,93 \pm 0,97 \text{ mg d'O}_2/\text{L}$ alors que dans le ruisseau on trouve $37,98 \pm 0,85 \mu\text{S/cm}$ et $7,57 \pm 0,39 \text{ mg d'O}_2/\text{L}$. L'analyse des ions montre que les deux ressources ne sont presque pas polluées par les espèces chimiques autres que le Ba^{2+} et les PO_4^{3-} . La toxicité liée à la pollution varie entre $4,75 \pm 1,71$ et $4,33 \pm 1,15 \text{ mg/L}$ en Ba^{2+} , puis entre $1,31 \pm 1,13$ et $2,77 \pm 2,07 \text{ mg/L}$ en PO_4^{3-} pour les puits et le ruisseau, dont la teneur est au-dessus des seuils requis ($0,7 \text{ mg/L}$ en Ba^{2+} et 2 mg/L en PO_4^{3-}). La nature des sols, mais surtout les rejets anthropiques expliqueraient cette altération. Enfin, le traitement à l'eau de Javel a un effet bénéfique sur la réduction de la pollution, exception faite pour les MES et les Nitrates. Cette étude sera élargie à d'autres sites et complétée par des tests microbiologiques, afin de cartographier les zones à risque.

MOTS-CLEFS: Eaux de puits, eaux de rivière, paramètres physico-chimiques, quartier Nzeng-Ayong Dragages, Libreville Gabon.

1 INTRODUCTION

L'accès à l'eau destinée à la consommation humaine est une réalité presque indéniable dans les pays développés. Ce précieux liquide permet à l'Homme de l'utiliser pour ses besoins domestiques (désalération, préparation des repas, arrosage des cultures, etc.). Cependant, tout le monde n'en dispose pas en qualité et en quantité suffisante [1]. C'est notamment le cas des pays en voie de développement, où l'accès à ce fluide vital reste un enjeu de premier ordre. La croissance démographique considérable que connaît ces pays et leurs conditions économiques laborieuses entraînent une urbanisation anarchique difficilement contrôlable [2, 3], particulièrement dans les villes, source de la dégradation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de surface et des eaux souterraines.

Due aux insuffisances en infrastructures de production d'eau potable et d'assainissement des eaux usées, et qui suivent très rarement l'extension et l'urbanisation des villes africaines; expliquant ainsi les nombreux problèmes d'approvisionnement en eau des quartiers périphériques. La majorité des populations des quartiers sous intégrés des régions sub-sahariennes utilisent l'eau non traitée provenant des puits, des lacs et des rivières pour leurs besoins domestiques [4, 5, 6, 7]. Pourtant, ces eaux pourraient contenir des polluants chimiques et d'autres substances toxiques dissoutes dans l'eau qui, à des concentrations anormales, pourraient être impropres à la consommation et donc avoir des conséquences plutôt graves sur l'environnement et la santé humaine [8, 9].

Libreville, capitale politique de la République gabonaise, n'est pas en reste des problèmes liés à la desserte et à l'adduction en eau potable, surtout dans les zones périphériques. C'est le cas notamment du quartier Nzeng-Ayong Dragages dans le 6^{ème} Arrondissement de cette métropole. Situé au Nord-Est de Libreville, la population de Nzeng-Ayong Dragages est estimée à près de 72 792 équivalent-habitant sur une superficie de 1 200 ha, d'après les données recueillies auprès de la mairie de cet arrondissement. Le quartier souffre non seulement d'un manque d'approvisionnement en eau, mais également des problèmes d'électrification et de transport en commun. Depuis plusieurs années, la société en charge de la distribution de l'eau et de l'électricité (Société d'Énergie et d'Eau du Gabon, SEEG) éprouve de nombreuses difficultés à ravitailler correctement sa clientèle en cette énergie fondamentale. Le problème d'approvisionnement en eau potable reste donc entier. Pendant ce temps, les populations sont contraintes d'utiliser de l'eau provenant des puits, des rivières ou même des ruisseaux pour satisfaire aux exigences quotidiennes. Si ces ouvrages naturels ont l'avantage de résoudre le problème de la disponibilité de l'eau, la qualité de cette denrée n'est pas souvent garantie.

Finalement, l'étude de la qualité des eaux consommées par les usagers de ce quartier revêt d'un intérêt particulier, son bassin versant faisant en outre l'objet de plusieurs travaux d'aménagement, suite au stress d'origine anthropique. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de la qualité des eaux de puits et des rivières dans beaucoup de pays de la sous-région ouest; notamment au Bénin, au Ghana, au Togo, etc. [10, 11]. Cependant à notre connaissance, très peu ou pas du tout de travaux ne semblent être notés sur la qualité des eaux des puits à usage domestique en République gabonaise, en particulier ceux de la capitale, où la démographie est de jour en jour plus galopante et où ces puits constituent de véritables sources d'approvisionnement pour beaucoup de ménages. Les données scientifiques dans ce domaine de recherche restent encore un challenge ambitieux, car ne sont malheureusement pas ou peu répertoriées en l'état actuel de nos connaissances.

Partant de ce constat, le but visé par la présente étude est d'évaluer la qualité physico-chimique de quelques puits domestiques et de la rivière jouxtant le quartier de Nzeng-Ayong Dragages. L'objectif à long terme est donc de disposer d'une cartographie des principaux puits (nombres et degré de pollution) de la zone étudiée.

L'évaluation de cette qualité des eaux est basée sur la caractérisation des paramètres physico-chimiques, incluant notamment: le potentiel d'hydrogène (pH), la Conductivité électrique (CE), l'Oxygène dissous (O_{2diss}), la Salinité (en NaCl), le taux de Matières en Suspension (MES), le Fer total (Fe) et les espèces ioniques suivantes (Ba^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} et SO_4^{2-}), susceptibles de s'accumuler dans l'organisme humain et provoquer des maladies d'origine hydrique (méthémoglobinémie ou syndrome du 'bébé bleu', saturnisme...).

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 SITES DE PRÉLÈVEMENTS

L'étude est menée sur des échantillons d'eau provenant de puits traditionnels et sur le cours d'eau (Amont, 'Milieu' et Aval) traversant le quartier Nzeng Ayong Dragages.

Le choix de ces deux sites repose non seulement sur la fréquence d'utilisation des puits par les populations environnantes, la proximité des sources potentielles de pollution mais également de l'accord préalable donné par les différents propriétaires de ces lieux d'approvisionnement en eau. Il est à signaler que pour des raisons de sécurité sanitaire, beaucoup de ménages n'autorisent pas l'accès en ces lieux aux personnes étrangères. La Figure 1 montre à titre informatif, une vue générale du site d'étude.



Fig. 1. Vue panoramique du quartier de Nzeng Ayong Dragages (site d'étude)

2.2 PRÉLÈVEMENTS

Les prélèvements (en tréplicat) sont effectués au niveau de quatre puits domestiques et sur la rivière environnante, comme précédemment indiqué. L'échantillonnage est réalisé en saison pluvieuse, précisément au moins de mars, où le niveau de précipitation est abondant. Dans le Tableau 1, sont présentées quelques caractéristiques visuelles des différents points d'eau, allant des coordonnées géographiques des sites, de la profondeur estimée du puits, à l'état de la structure en-elle-même, et éventuellement quelques détails sur l'environnement aux alentours de chaque point de puisage. Les sites d'échantillonnages ont été géo-localisés à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) de type **Garmin GPSmap 62**.

Tableau 1. Description géo-spatiale, physique et environnementale des points d'eau

Échantillonnage [-]	Coordonnées GPS [utm 32N]	Profondeur du puits ^p [m]	État de la paroi du puits [-]	Couverture du toit [-]	Source potentielle de pollution [-]
Puits_1	N 00,44642° E 009,47532°	5	Cimentée et carrelée.	Couverte dans une cabane.	Á proximité d'une petite décharge.
Puits_2	N 00,44644° E 009,47756°	4	Cimentée et dalle de protection.	Couverte dans une maisonnette.	Jardin potager, latrines et coin lavage de linge.
Puits_3	N 00,44451° E 009,47488°	6	Cimentée, dalle et couvercle de sécurité.	Á ciel ouvert.	Toilette éloignée, cours d'eau.
Puits_4	N 00,44635° E 009,47651°	6	Cimentée, dalle de protection.	Á ciel ouvert.	Proximité maison, dans la barrière.
Cours d'eau_Amont	N 00,41918° E 009,49012°	-	Á proximité d'un jardin de maïs, d'une école primaire, d'une décharge d'ordures et d'une station de lavage de voitures.		
Cours d'eau_Milieu	N 00,42755° E 009,48601°	-	Á proximité d'une décharge d'ordures et cours d'eau polluée par des déchets de toutes sortes (épaves voitures, bidons, déchets ménagers...).		
Cours d'eau_Aval	N 00,44656° E 009,47747°	-	Á environ à 50 m du Puits 2, latrines à 80 m, couvert végétal.		

(-): Profondeur non mesurée sur le cours d'eau.

(p): Profondeur du puits estimée à l'aide d'une corde lestée.

La population locale dépend véritablement de l'eau provenant de ces puits pour ses besoins quotidiens, comme le montre la Figure 2, où l'on voit les riverains s'en approvisionner.



Fig. 2. Quelques puits domestiques utilisés pour l'approvisionnement en eau.

Pour les eaux collectées dans les puits, la prise d'eau est réalisée au moyen d'un seau lesté à une corde (un seau de puisage par puits), utilisé pour prélever les eaux. Quant aux échantillons de rivière, la collecte est faite dans la veine principale du cours d'eau à environ 20 cm de profondeur et selon une direction opposée au sens de l'écoulement [12]. Plus précisément, les échantillons sont recueillis dans des flacons en polyéthylène (V= 1 000 mL), préalablement lavés au savon de ménage, puis à l'acétone et enfin à l'eau distillée. Chaque récipient est ensuite rincé deux fois avec l'eau à analyser, puis rempli par ce même liquide avant d'être porté à l'abri de la lumière, dans une glacière maintenue à une température de 4 °C durant le transport au laboratoire [13, 14]. Certains échantillons ont été additionnés de 1 mL d'hypochlorite de sodium (eau de Javel "la Croix", NaClO, de concentration 12° chlorimétrique soit environ 38 040 mg/L) dans le but de mimer ce qui se fait traditionnellement dans les ménages. La Figure 3 illustre ce type de traitement chimique, après la collecte de quelques seaux d'eau par les principaux utilisateurs de cette ressource.



Fig. 3. Post-traitement à l'eau de Javel de l'eau recueillie au puits

2.3 ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

2.3.1 MESURES PHYSIQUES

Les paramètres physiques tels que: la Température [°C], le pH [-], la Conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$] et l'Oxygène dissous [$\text{mg d'O}_2/\text{L}$] sont mesurés in situ, au moyen d'une mallette **multi-paramètre 3420-SET-G** muni d'une sonde de pH Sentix, d'une sonde de conductivité électrique et d'une sonde combinée oxygène/température (Figure 4). Ces paramètres donnent une première indication sur la qualité des eaux à analyser. L'instrument de mesures est préalablement étalonné avant la campagne d'échantillonnage. Son utilisation consiste tout simplement à introduire la sonde appropriée dans le milieu liquide, puis attendre la stabilisation et l'affichage de la mesure sur le boîtier écran de l'appareil.



Fig. 4. Multi-paramètre (3420-SET-G) avec une sonde pH, une sonde conductivité électrique et une sonde oxygène dissous/température.

2.3.2 MESURES CHIMIQUES

- Les Matières en Suspension, MES

Les Matières en Suspension sont déterminées par filtration de l'échantillon d'eau grâce à une pompe à vide (dispositif de type Büchner), (Figure 5). Une membrane filtrante (commercialisée par la société Hydrophilic Nonsterile, **référence HAWPO4700**) de 47 mm diamètre et de porosité $0,45 \mu\text{m}$, préalablement pesée (M_0), est placée entre le fritté et le récipient permettant de recueillir le filtrat (fiolle). Le processus de séparation solide/liquide est actionné au moyen d'une pompe.

Une quantité connue ($V= 100 \text{ mL}$) de l'échantillon liquide est versée dans l'entonnoir de la fiolle de filtration jusqu'à succion complète. Á la fin de l'expérience, on obtient la masse du résidu sec après étuvage à 105 °C pendant 1h 30 min, suivi d'un

refroidissement dans un dessiccateur durant 30 minutes, et pesée, M_2 [14]. Connaissant la masse initiale M_0 de la membrane avant filtration et la masse finale M_1 après étuvage et dessiccation, la teneur en Matières en Suspension, rapportée au volume filtré, est calculée (Éq. 1).

$$\text{MES [mg/L]} = \frac{M_1 - M_0}{V} \times 1000 \quad (\text{Éq. 1}).$$

M_0 [mg]: masse du papier filtre avant filtration; M_1 [mg]: masse du papier filtre et les solides fixés après filtration et étuvage à 105° C; V [mL]: volume de l'échantillon d'eau à filtrer.



Fig. 5. Dispositif de filtration sur cellule Büchner

1: Fritté contenant l'eau à analyser; 2: pompe à vide permettant la succion du liquide; 3: fiole collectant le filtrat après passage de l'échantillon d'eau à analyser à travers un filtre de porosité 0,45 µm, qui a pour but de piéger les particules solides extraites du milieu liquide.

- *Salinité de Morh, NaCl*

La salinité donne une idée de la concentration en sels dissous de l'échantillon. En laboratoire, elle est déterminée par **titrage** de l'ion Chlorure contenu dans l'échantillon par l'ion Argent contenu initialement dans une solution de nitrate d'argent, ($\text{Ag}^+ + \text{NO}_3^-$) à $C_1 = C_{\text{AgNO}_3} = 0,1 \text{ mol/L}$, en présence de Chromate de potassium ($2\text{K}^+ + \text{CrO}_4^{2-}$) à 10%. Ce qui permet de déterminer la "chlorinité" de l'eau et donc, de calculer sa salinité (Éq. 2).

Le protocole de détermination de la teneur en sel est résumé comme suite. Dans un bécher contenant un volume, $V_2 = 100 \text{ mL}$ de l'échantillon d'eau à doser, on ajoute 3 à 4 gouttes d'une solution de Chromate de potassium comme indicateur coloré, le tout est mis en agitation avec un barreau aimanté. On obtient, une solution à titrer de coloration jaune persistante. Ensuite, on dose par addition progressive de la solution de nitrate d'argent, jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge brique de Chromate d'argent. Ce qui indique la fin de la réaction par la formation d'un précipité de Chlorure d'argent (AgCl). On note le volume versé d' AgNO_3 à l'équivalence, ($V_{\text{eq}} = V_{\text{AgNO}_3}$). Le dispositif expérimental est illustré sur la Figure 6.

$$\text{NaCl [mg/L]} = \frac{V_{\text{AgNO}_3} \times C_{\text{AgNO}_3} \times M_{\text{NaCl}} \times 1000}{V_2} \quad (\text{Éq. 2}).$$

V_{AgNO_3} [mL]: volume équivalent de la solution titrante d' AgNO_3 ; C_{AgNO_3} [mol/L]: concentration initiale de la solution titrante d' AgNO_3 ; M_{NaCl} [g/mol]: masse molaire de NaCl ($M_{\text{NaCl}} = 58,5 \text{ g/mol}$); V_2 [mL]: volume de l'échantillon d'eau dans le bécher.



Fig. 6. Détermination de la salinité de l'eau par titrage de l'ion Chlorure, Cl^- par l'ion argent, Ag^+ ; en présence de Chromate de potassium, K_2CrO_4 .

- **Minéralogie**

La teneur en [mg/L] des paramètres chimiques que sont: les ions Baryum (Ba^{2+}), les ions Calcium (Ca^{2+}), les ions Chlorures (Cl^-), les ions Nitrates (NO_3^-), les ions Phosphates (PO_4^{3-}), les ions Sulfates (SO_4^{2-}) et le Fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}) est déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre de type **Hach DR 3900**, Figure 7. La détermination de la concentration en ions est réalisée sur le liquide épuré, recueilli durant la phase de filtration, afin d'éliminer les Matières en Suspension susceptibles d'altérer les mesures [15]. Le principe de cette manipulation est résumé ainsi qui suit: à la longueur d'onde fixée, la concentration d'une substance est proportionnelle à son Absorbance, selon la loi de Beer-Lambert (Éq. 3).

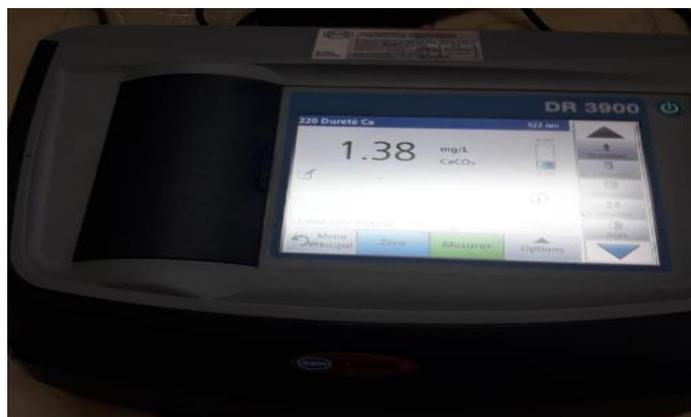


Fig. 7. Spectrophotomètre Hach DR 3900, pour la détermination de la teneur en ions
Le 'blanc' est réalisé avec l'échantillon d'eau à analyser sans ajout de réactif chimique.

$$A [-] = \epsilon \cdot l \cdot C \quad (\text{Éq. 3}).$$

ϵ [$\text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$]: coefficient d'absorption moléculaire; l [cm]: longueur du trajet optique; C [$\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$]: concentration de la substance dans l'eau.

Finalement, le dosage de l'échantillon d'eau est réalisé par l'ajout d'un ou des plusieurs réactifs fournis sous la forme de kits, dans un volume à dissoudre compris entre 10 et 50 mL de solution aqueuse. Le zéro de concentration (communément appelé 'blanc') est effectué avec l'échantillon d'eau à doser, sans ajout de réactif. Pour toutes les analyses effectuées, trois mesures sont réalisées et les résultats moyennés.

2.4 GRILLE D'ÉVALUATION DE LA QUALITÉ

Pour connaître l'état globale de la qualité des paramètres étudiés d'une part, et si cette qualité est compatible avec une utilisation de l'eau à l'échelle domestique d'autre part, l'interprétation des résultats est basée à partir des grilles d'évaluation de la qualité des eaux. Conformément aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et du Système d'Évaluation de la Qualité des Eaux (Seq-Eau) [16, 17]. Ces grilles distinguent cinq (5) niveaux de qualité, allant de la classe de qualité d'eau la plus excellente (code couleur en bleu) à la classe la plus médiocre (code couleur en rouge). Le Tableau 2 reprend les limites d'appréciation de cette qualité, pour chaque paramètre évalué.

Tableau 2. Grille d'évaluation de la qualité des eaux [18, 19]

Paramètres \ Classes	Très bon 1A	Bon 1B	Moyen 2	Médiocre 3	Mauvais 4
Température, T [°C]	20	21,1	26	28	≥28
potentiel d'Hydrogène, pH [-]	6,5-8,2	6-6,5 et 8,2-9	5,5-6 et 9-9,5	4,5-5,5 et 9,5-10	≤4,5 et ≥10
Conductivité, CE [µS/cm]	180-2500	120-180 et 2500-3000	60-120 et 3000-3500	0-60 et 3500-4000	≤0 et ≥4000
Oxygène dissous, O ₂ [mg.O ₂ /L]	8	8-6	6-4	4-3	≤3
Salinité, NaCl [mg/L]	-	-	300	500	-
MES [mg/L]	0-5	5-25	25-38	38-50	≥50
Barium, Ba ²⁺ [mg/L]	0,1	-	-	0,7	-
Calcium, Ca ²⁺ [mg/L]	-	-	-	100	-
Fer total, Fe [mg/L]	-	-	-	200	-
Chlorures, Cl ⁻ [mg/L]	-	-	-	250	-
Nitrates, NO ₃ ⁻ [mg/L]	0-2	2-10	10-25	25-50	≥50
Orthophosphates, PO ₄ ³⁻ [mg/L]	0-0,1	0,1-0,5	0,5-1	1-2	≥2
Sulfates, SO ₄ ²⁻ [mg/L]	-	150	-	400	≥400

(-): Valeurs non communiquées, on se basera sur les limites inférieures et supérieures.

3 RÉSULTATS

3.1 ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

3.1.1 MESURES PHYSIQUES

Pour toutes les analyses effectuées, les normes de qualité présentées dans la partie Matériels et Méthodes ont servi de support à l'interprétation des données. Les résultats des analyses physiques, comprenant la Température, le potentiel d'Hydrogène, la Conductivité électrique et l'Oxygène dissous sont consignés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Variation des paramètres physiques en fonction de la source d'eau

Échantillonnage [-]	Température [°C]	pH [-]	Conductivité [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	Oxygène dissous [$\text{mg d'O}_2/\text{L}$]
Puits_1	25,1	6,2	177,04	8,76
Puits_2	25	7,9	166,79	7,63
Puits_3	24,9	5,9	189,76	9,52
Puits_4	25,2	4,7	201,22	9,81
Moyenne	25,05±0,13	6,18±1,32	184,20±15,78	08,93±0,97
Cours d'eau_Amont	22,8	7,3	37,03	7,25
Cours d'eau_Milieu	24,5	7,3	38,26	7,45
Cours d'eau_Aval	26,3	7,1	38,65	8,01
Moyenne	24,53±1,75	7,23±0,12	37,98±0,85	7,57±0,39

En moyenne, la température de l'eau est du même ordre sur l'ensemble des puits analysés, soit une eau ne dépassant pas les 25,05±0,13 °C. La valeur minimale est obtenue au niveau du puits 3 tandis que le maximum est atteint au puits 4, respectivement de 24,9 et 25,2 °C. Pour le ruisseau, on constate que ce paramètre augmente légèrement (de quelques degrés) de l'amont vers l'aval du cours d'eau, passant de 23 à 26 °C, avec une valeur moyenne de 24,53±1,75 °C; donc très proche de celle donnée par les puits. Il en résulte que, les valeurs trouvées sont conformes au seuil de qualité 'moyen', conformément à la grille d'évaluation.

Au niveau du pH, une valeur au-dessus de la neutralité est observée pour le puits 2 (pH=7,9) tandis que les trois autres puits (puits 1, 3 et 4) présentent un pH plutôt acide, compris entre 4,7 et 6,2, avec une acidité très élevée au puits 4 (pH= 4,7). Cette acidité de l'eau peut être due à la nature géologique du sol, qualifié de calco-ferrugineux. Néanmoins, la moyenne de pH est de l'ordre de 6,18±1,32 °C, classant donc ces puits en état 'bon', en référence à la norme de l'OMS citée plus haut. L'eau de la rivière présente quant à elle, un pH neutre de l'amont vers l'aval, avec une moyenne générale autour de 7,23±0,12 °C.

La mesure de la Conductivité permet d'apprécier la quantité globale des sels dissous dans l'eau, donc de sa minéralisation. Pour les puits, les valeurs enregistrées varient entre 166,79 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le puits 2 à 201,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le puits 4. La moyenne est d'environ 184,20±15,78 $\mu\text{S}/\text{cm}$, traduisant ainsi une classe d'eau de qualité 'bon', voir 'très bon' (entre 120 et 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Cf. directive de l'OMS). S'agissant du cours d'eau, on remarque que cette donnée électrique s'élève progressivement de l'amont vers l'aval avec une moyenne de 37,98±0,85 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ceci est en accord avec ce qui est généralement observé dans les cours d'eau [12].

La teneur en Oxygène dissous est presque similaire pour tous les puits étudiés. La valeur minimale (7,63 mg d'O₂/L) correspond à l'oxygénation du puits 2 et la valeur maximale (9,81 mg d'O₂/L) est obtenue dans le puits 4. La moyenne pour l'ensemble des puits vaut 08,93±0,97 mg d'O₂/L, valeur qui correspond à des eaux généralement bien oxygénées. Au niveau du ruisseau, la teneur en O₂ dissous montre également une eau de bonne qualité, allant de 7,25 en amont à 8,01 mg d'O₂/L lorsqu'on atteint l'aval. Ce qui pourrait témoigner d'une bonne survie des espèces aquatiques et d'une oxydation de la matière organique contenue dans l'eau.

3.1.2 MESURES CHIMIQUES

Les analyses chimiques concernent les paramètres globaux que sont: les MES, le NaCl, la teneur en Fe total et en Cations/Anions métalliques (Xⁿ⁺ et Xⁿ⁻).

- *Les Matières en Suspension, MES*

Les Matières en Suspension (MES) représentent les particules non dissoutes (minérale ou organique) en suspension dans l'eau. La Figure 8 présente la teneur en MES en fonction des deux types de source d'eau, et du post-traitement à l'eau de Javel. Le taux de MES varie entre 1 et 14,4 mg/L pour tous les puits. Les plus faibles valeurs en MES sont enregistrées respectivement au niveau des puits 1 (MES=1 mg/L) et puits 3 (MES=2,4 mg/L). Les puits 2 (MES=14,4 mg/L) et puits 4 (MES=11,2 mg/L) montrent les maximas (Figure 8/a). Ces teneurs en MES élevées par rapport à celles des autres puits, sont certainement associées à la coloration et à la transparence de l'eau, plutôt 'trouble' et déjà mentionnées plus haut (Cf. Figure 3). Toutefois,

les valeurs observées sont largement en-dessous du seuil de qualité fixé par les normes standards (Cf. Tableau 2), ce qui traduit une bonne qualité de l'eau du point de vue des MES. La moyenne des MES pour l'ensemble des puits vaut $07,30 \pm 6,57$ mg/L.

Par contre, pour les eaux du cours d'eau, on constate que le taux de MES est presque double de celui observé au niveau des puits, surtout dans sa partie amont et médiane (MES= 24 mg/L). En aval on note une chute d'environ 20% par rapport à la partie amont. Ce qui dénote une réelle diminution de la pollution en substances non dissoutes. Ceci pourrait s'expliquer par un lessivage ou alors une dilution des eaux de l'amont vers l'aval. Cela est visible le long du ruisseau où, un colmatage du fond du lit du cours d'eau (en amont) dû au dépôt de matières fines est observé, colmate qui diminue progressivement lorsqu'on atteint la partie aval du ruisseau (environ sur une distance de 2 km). La moyenne des MES est également évaluée dans ce cas-ci, on obtient une valeur de $17,30 \pm 10,86$ mg/L.

L'effet du traitement à l'eau de Javel a été étudié afin de rendre compte de cette pratique, couramment utilisée par les populations pour la désinfection de l'eau. Les puits 1 et 2 ont servi d'exemple pour tester ce type de traitement chimique sur la qualité de l'eau consommée (Figure 8/b). On constate que l'eau de Javel a un impact plutôt négatif sur le taux de MES de départ. Les MES augmentent d'un facteur de près de 43% lors de l'ajout en hypochlorite de sodium (pour ces deux puits, la moyenne de MES= $17,00 \pm 22,10$ mg/L). Il semblerait que le désinfectant a tendance à agir avec l'eau pour extraire encore plus les plus petites particules de matières dissoutes contenues dans le liquide, tout en inactivant les pathogènes présents dans l'eau. Une autre explication serait que: une étape de filtration préalable serait nécessaire avant la désinfection à l'hypochlorite de sodium (NaClO), comme cela se fait traditionnellement durant le traitement classique, en usine de production d'eau potable (coagulation-floculation/décantation/filtration/désinfection).

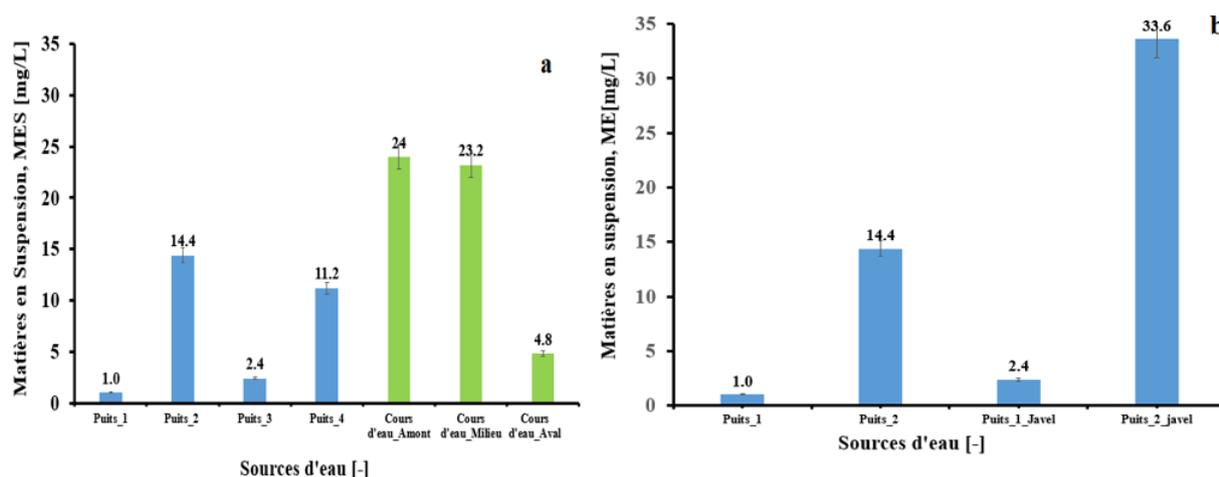


Fig. 8. Variation de la teneur en Matières en Suspension (MES) en fonction de la source d'eau (a) et du post-traitement à l'eau de Javel (b).

- La Salinité de Morh, NaCl

La Salinité représente la somme des concentrations en sels dissous dans l'eau (Chlorures, Sulfates, Calcium, Sodium, Magnésium...). Dans le cadre de cette étude, elle correspond à la teneur en sel sodique. La Figure 9 montre les variations de cette mesure en fonction de la source d'eau d'une part, et du post-traitement à l'eau de Javel, d'autre part.

Dans l'eau de puits, la salinité augmente de 11,12 pour le puits 1 à 121,68 mg/L pour le puits 2. Les puits 3 et 4 ont des valeurs de salinité respectivement de 76,64 et 35,1 mg/L. Pour cet indice, la valeur moyenne calculée est de $61,14 \pm 48,60$ mg/L. Pour ce qui est du cours d'eau, le paramètre salinité est presque constant de l'amont vers l'aval avec une moyenne de l'ordre de $42,82 \pm 1,74$ mg/L. Ce qui représente une teneur en sels dissous 70% moins élevée que celle des puits (Figure 9/a). Dans tous les cas, les valeurs obtenues de salinité, sont en-dessous de la norme admissible (salinité ≤ 500 mg/L).

S'agissant du taux de salinité obtenue après un traitement à l'eau de Javel (Figure 9/b), on constate que cet indicateur augmente fortement lorsqu'on rajoute le NaClO au liquide de départ, d'un facteur d'environ 7,73% pour le puits 1 et 47,49% pour le puits 2. La teneur moyenne obtenue dans ce cas vaut: $200,07 \pm 79,42$ mg/L de NaCl. Le traitement de post-'Javelisation' a donc tendance à augmenter la teneur en ions dissous, favorisant ainsi la minéralisation des eaux.

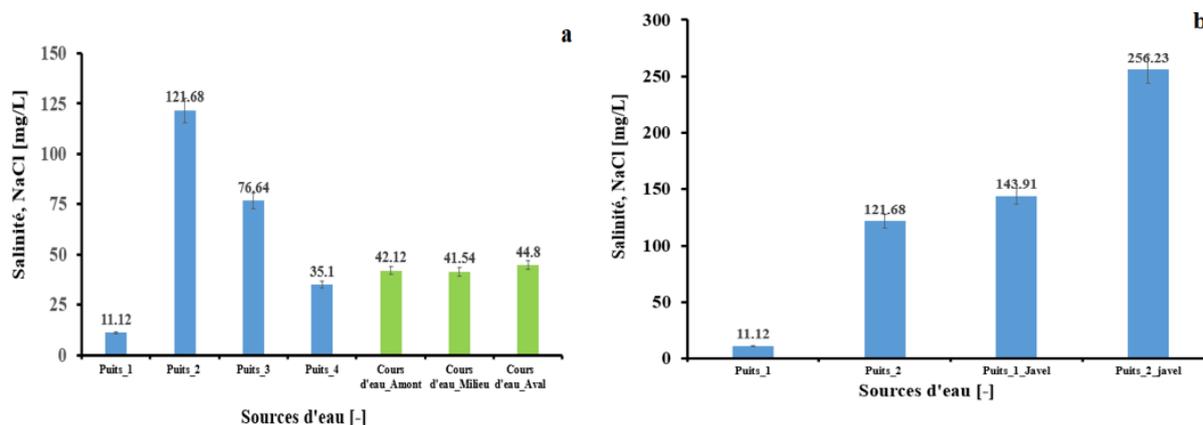


Fig. 9. Variation du taux de Salinité (NaCl) en fonction de la source d'eau (a) et du post-traitement à l'eau de Javel (b).

• Les Cations métalliques, X^{n+} et le Fer total, Fe

La Figure 10 présente les résultats d'analyses de la variation de la teneur en cations métalliques en fonction de la source d'eau; et ceux obtenus lorsqu'on additionne de l'eau de Javel à l'eau pré-collectée.

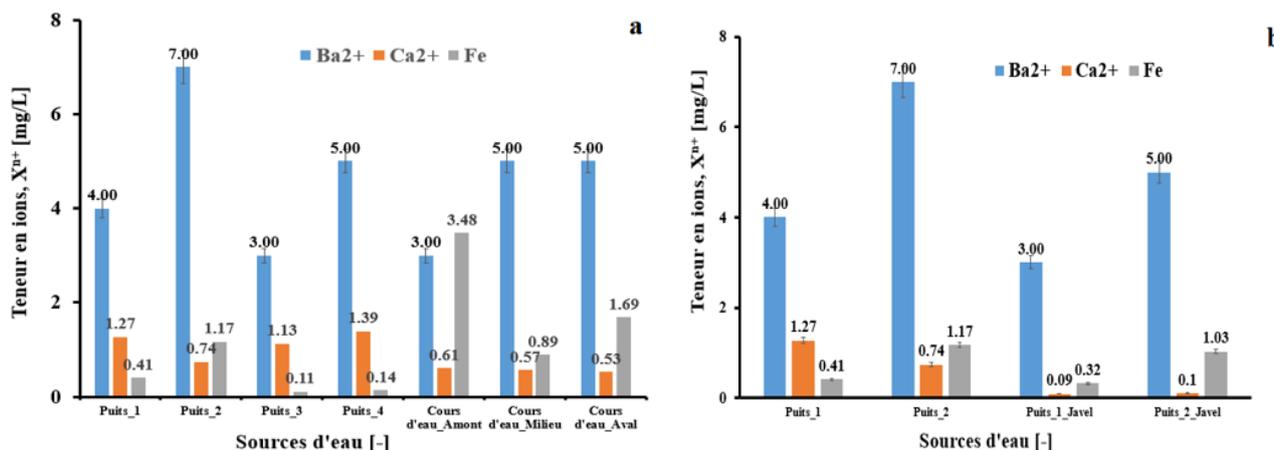


Fig. 10. Variation de la teneur en cations métalliques et du Fer total (X^{n+} et Fe) en fonction de la source d'eau (a) et du post-traitement à l'eau de Javel (b).

Pour les puits, il ressort que la valeur la plus faible en ions Baryum ($Ba^{2+}=3$ mg/L) est enregistrée au puits 3 et la plus forte 7 mg/L, au niveau du puits 2. Les puits 1 et 3 donnent respectivement des valeurs en ions Ba^{2+} de l'ordre de 4 et 3 mg/L. En moyenne pour les quatre puits, on obtient une valeur de $4,75\pm 1,71$ mg/L en Ba^{2+} .

Pour ce qui est de l'eau du cours d'eau, la moyenne en ions Baryum est de $4,33\pm 1,15$ mg/L. La valeur minimale 3 mg/L, est notée en amont et la plus forte 5 mg/L, en aval du ruisseau. Au regard des fortes teneurs en Ba^{2+} constatées, qui sont six (6) fois supérieures à la norme indiquée ($Ba^{2+}\leq 0,7$ mg/L, OMS), ces deux écosystèmes (puits et ruisseau) sont très fortement pollués par le baryum.

L'indice calcique est à peu près de même ordre de grandeur d'un puits à l'autre ($Ca^{2+}= 1$ mg/L), ceci serait probablement lié à la lithologie de la nappe phréatique. La valeur la plus faible est obtenue au niveau du puits 2 ($Ca^{2+}= 0,74$ mg/L), et la plus forte est donnée par le puits 4 ($Ca^{2+}= 1,39$ mg/L), avec une moyenne d'environ $1,13\pm 0,28$ mg/L pour l'ensemble des puits.

Dans le cas de la rivière, la même tendance est observée; on obtient le même ordre de grandeur de l'amont vers l'aval ($0,5\pm 0,04$ mg/L en Ca^{2+} et moyenne= $0,57\pm 0,04$ mg/L). Les valeurs sont très proches les unes des autres.

Concernant le Fer total (Fe^{2+} et Fe^{3+}), il est presque absent dans la plupart des puits analysés. On constate tout de même un léger pic au niveau du puits 2 ($\text{Fe} = 1,17 \text{ mg/L}$). La moyenne en Fer totale dans les puits ne dépasse pas les $0,46 \pm 0,49 \text{ mg/L}$, valeur presque négligeable par rapport au seuil de l’OMS, $\text{Fe} \leq 200 \text{ mg/L}$.

S’agissant de la rivière, la moyenne en Fer total est de $2,02 \pm 1,33 \text{ mg/L}$, donc quatre fois plus élevée que dans les puits. La valeur la plus forte ($\text{Fe} = 3,48 \text{ mg/L}$) est constatée en amont du ruisseau tandis que la plus faible, $\text{Fe} = 1,89 \text{ mg/L}$ est observée en aval (Figure 10/a). Au regard de ce résultat qui montre des teneurs en Fer en-dessous du seuil de toxicité, la pollution en Fer total n’est donc pas significative: ni dans les puits, ni dans le cours d’eau traversant le quartier.

Lorsque l’on traite les puits avec la solution d’eau de Javel, les teneurs en cations divalents et en Fer total décroissent (Figure 10/b). Pour l’ion Ba^{2+} , la diminution relevée est de 75% pour le puits 1 et 71,43% pour le puits 2. Quant au Calcium, cette réduction est respectivement de 7,09% pour le puits 1 et 13,51% pour le puits 2, la moyenne en Ca^{2+} pour les deux puits ‘javellisés’ vaut $0,10 \pm 0,01 \text{ mg/L}$. Ce résultat pourrait avoir une influence plutôt négative sur la croissance des enfants, quand on sait que cet ion joue un rôle essentiel dans la calcification du squelette osseux. Enfin pour le Fer, le taux de réduction est à nouveau observé. Le puits 1 passe de 0,41 à 0,32 mg/L en Fe, lors de l’ajout en Javel (soit une réduction de 78,05%) et le puits 2 de 1,71 à 1,03 mg/L de Fe lors du même traitement (taux de réduction = 60,23%).

- *Les anions métalliques, X^{n-}*

Le Tableau 4 regroupe les données obtenues pour la variation de la teneur en anions en fonction de la source d’eau. La teneur en ions Chlorures oscille entre 6,75 et 73,84 mg/L (teneur maximale) pour les puits 1 et puits 2. Les puits 3 et 4 donnent respectivement 21,30 et 46, 51 mg/L en Cl^- . Finalement, la concentration moyenne en Cl^- vaut $37,1 \pm 29,49 \text{ mg/L}$.

Dans le cas du cours d’eau, la concentration en Chlorures est quasi constante de l’amont vers le point ‘milieu’ ($\text{Cl}^- = 25,39 \text{ mg/L}$), elle augmente d’environ 2% lorsqu’on atteint l’aval. Cette légère augmentation pourrait probablement être due à un apport anthropique supplémentaire, mais qui reste tout de même sans effets néfastes pour le milieu. Les valeurs calculées se situant largement en-dessous du seuil préconisé par l’OMS, $\text{Cl}^- \leq 250 \text{ mg/L}$. La valeur moyenne dans le cours d’eau est de $25,99 \pm 1,06 \text{ mg/L}$ en Cl^- . Toutefois, il est à noter que les Chlorures sont sans conséquences toxiques pour l’homme, même à des concentrations assez élevées ($\text{Cl}^- \geq 1000 \text{ mg/L}$), comme rapportés par Zouag et Belhadj [20]. En revanche, des eaux trop chlorurées peuvent donner à l’eau une saveur plutôt salée.

Pour les Nitrates, dans l’ensemble, les valeurs relevées sont très faibles ou alors sous forme de traces. On note quand même un pic de 0,1 mg/L en NO_3^- dans le cas des puits 3 et 4. La moyenne pour l’ensemble des puits donne $0,08 \pm 0,05 \text{ mg/L}$, et $0,01 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ de Nitrates dans le cas de la rivière. Ces concentrations quasi faibles témoignent du bon état écologique de ces eaux. Ceci est en lien avec les valeurs d’oxygène dissous (comprises en moyenne entre 7 et 9 mg d’ O_2/L), qui montrent clairement un approvisionnement en oxygène dans le milieu.

Les Orthophosphates correspondent à la forme minérale du phosphore la plus disponible. Pour ces ions, les puits: 1, 3 et 4 montrent des teneurs en PO_4^{3-} proches de l’unité et en adéquation avec les valeurs moyennes recommandées par la norme environnementale (entre 0,1 et 1 mg/L de PO_4^{3-}). Le puits 2 est quant à lui déclassé en état ‘mauvais’ en raison de la concentration élevée en PO_4^{3-} , arborant un pic de l’ordre de 3 mg/L, donc supérieur au seuil de toxicité fixé à 2 mg/L. Les latrines et l’endroit dédié au lavage de linge, situés à proximité de ce puits (Cf. Tableau 1) peuvent être à l’origine de ces concentrations excessives. Les rejets en terme d’eaux usées domestiques lors de ces lessives (utilisations de détergents), l’érosion des sols et le ruissellement des eaux au cours d’un événement pluvieux (pour les latrines) sont des sources supplémentaires d’Orthophosphates. Ces apports d’origine anthropique augmentent inévitablement la concentration de ce polluant dans l’eau. Les quatre puits donnent une teneur moyenne en PO_4^{3-} d’environ $1,31 \pm 1,13 \text{ mg/L}$.

Dans le cas de l’eau provenant du ruisseau, la partie amont dénote une forte tendance à la hausse, avec une valeur atteignant les 5 mg/L de PO_4^{3-} . Á cet endroit, la pollution par les Orthophosphates est remarquable, en lien étroit avec les observations visuelles précisées dans le Tableau 1 (à proximité d’un potager où l’on cultive du maïs en utilisant des produits phytosanitaires mal contrôlés lors de l’arrosage des sols, mais également situé à côté d’une école primaire, d’une décharge publique et d’une station de lavage de voitures). Cette pollution phosphorée diminue au fur et à mesure que l’on s’avance vers l’aval du cours d’eau ($1,32 \text{ mg/L}$ de PO_4^{3-} , avec un facteur réductif d’environ 25,68%), liée probablement au phénomène de dilution durant la saison de pluie. La teneur moyenne en PO_4^{3-} calculée, est de $2,77 \pm 2,07 \text{ mg/L}$. Ce qui signifie que cette rivière se trouve indubitablement très polluée par les phosphates.

Enfin, pour les ions Sulfates, la teneur maximale ($\text{SO}_4^{2-} = 7 \text{ mg/L}$) est obtenue au puits 2 et le minima est atteint au puits 4, sous la forme de trace de SO_4^{2-} . Les puits 1 et 3 montrent des concentrations en SO_4^{2-} plutôt intermédiaires (soient 3 et 2 mg/L

respectivement). La moyenne des valeurs représente environ $4\pm 2,65$ mg/L de SO_4^{2-} . Dans le cours d'eau, cet ion est majoritairement présent sous la forme de trace, sauf au niveau de l'aval, où l'on observe une amplitude atteignant les 1 mg/L de SO_4^{2-} . Dans tous les cas, les valeurs trouvées (puits et cours d'eau compris) sont jugées négligeables (100 fois moins) par rapport à la directive de l'OMS ($\text{SO}_4^{2-} \leq 400$ mg/L), ce qui témoigne dans ces deux milieux, d'une tendance qualité flirtant avec le niveau 'très bon' en Sulfates.

Tableau 4. Variation de la teneur en anions (X^n) en fonction de la source d'eau

Échantillonnage [-]	Cl^- [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	PO_4^{3-} [mg/L]	SO_4^{2-} [mg/L]
Puits_1	6,75	0,03	0,65	3,00
Puits_2	73,84	Trace	3,00	7,00
Puits_3	46,51	0,10	0,75	2,00
Puits_4	21,30	0,12	0,84	Trace
Moyenne	37,1±29,49	0,08±0,05	1,31±1,13	4±2,65
Cours d'eau_Amont	25,56	0,00	5,14	Trace
Cours d'eau_Milieu	25,21	0,01	1,85	Trace
Cours d'eau_Aval	27,20	0,02	1,32	1,00
Moyenne	25,99±1,06	0,01±0,01	2,77±2,07	1^(a)

(a): aucun écart-type ne saurait être estimé avec une seule valeur, les autres étant sous la forme de traces.

Dans le Tableau 5, sont mentionnées les teneurs en anions, obtenues lorsque l'eau des puits subit le post-traitement à l'hypochlorite de sodium (NaClO).

Tableau 5. Variation de la teneur en anions après un post-traitement à l'eau de Javel (NaClO)

Échantillonnage [-]	Cl^- [mg/L]	NO_3^- [mg/L]	PO_4^{3-} [mg/L]	SO_4^{2-} [mg/L]
Puits_1	6,75	0,03	0,65	3,00
Puits_2	73,84	Trace	3,00	7,00
Moyenne	40,30±47,44	0,03^(a)	1,83±1,66	5±2,83
Puits_1_Javel	87,33	0,60	0,30	Trace
Puits_2_Javel	155,49	0,50	0,66	2,00
Moyenne	121,41±48,20	0,55±0,07	0,48±0,25	2^(a)

(a): aucun écart-type ne saurait être estimé avec une seule valeur, les autres étant sous forme de traces.

Quand le fluide provenant des puits est additionné d'eau de Javel, la concentration en Cl^- s'élève de 6,75 à 87,33 mg/L pour le puits 1 et de 73,84 à 155,49 mg/L pour le puits 2. Soit une moyenne en Chlore allant de $40,30\pm 47,44$ à $121,41\pm 48,20$ mg/L. La dose de NaClO a un effet plutôt additionnel sur la teneur en ions Chlorures, en augmentant significativement la concentration en Cl^- , d'un facteur de 7,73% dans le premier cas et 47,49% dans le deuxième.

Pour les Nitrates, l'augmentation due à l'ajout de la Javel est moins prononcée. Elle passe de 0,03 à 0,6 mg/L (soit 5%) dans le puits 1 et de 'trace' (en-dessous de la limite de détection de l'instrument d'analyse) à 0,5 mg/L dans le puits 2, avec une moyenne en NO_3^- de $0,55\pm 0,07$ mg/L pour les deux puits considérés.

Par contre, on remarque un effet inverse pour ce qui est des deux autres anions (PO_4^{3-} et SO_4^{2-}). Dans le cas de l'étude de l'influence de NaClO sur la concentration en Orthophosphates, le désinfectant a tendance à diminuer la teneur en PO_4^{3-} dans les eaux (on passe de 0,65 sans traitement à 0,30 mg/L de PO_4^{3-} avec l'ajout de Javel, soit une réduction de 46,15%), effet moins prononcé dans le cas du second puits (réduction de 22%). Dans ces deux puits, la moyenne en PO_4^{3-} calculée vaut $0,48\pm 0,25$ mg/L. Le désinfectant permet donc réduire la teneur en polluant Phosphates contenus dans le milieu aquatique, à des concentrations très proches de la valeur limite ($\text{PO}_4^{3-} \leq 1$ mg/L). Pour les ions Sulfates, la même tendance est notée, c'est-à-dire que leur teneur baisse quand le liquide est traité à l'eau de Javel. Une diminution d'environ 28,57% est observée dans le puits 2. Le NaClO participe donc à diminuer considérablement la pollution sulfurée.

4 DISCUSSION

La plupart des paramètres physiques d'appréciation de qualité des eaux sont en faveur des deux systèmes écologiques étudiés (Cf. Tableau 3). Il est remarqué que: la Température de l'eau des puits et de la rivière est en moyenne de $25,05 \pm 0,13$ et $24,53 \pm 1,75$ °C, donc très proches l'une de l'autre et comparables aux valeurs obtenues par Kapembo et al [4]., dans leur travail portant sur la qualité des eaux de puits et de rivière de la ville de Kinshasa en République démocratique du Congo. Les auteurs trouvent des températures moyennes comprises entre 25 et 26 °C, ceci pourrait s'expliquer par la proximité géographique de ces deux pays, qui sont en effets situés dans la même zone tropicale.

Le pH de l'eau des puits a une tendance acide ($\text{pH} = 6,18 \pm 1,32$) tandis que celui de la rivière est préférentiellement alcalin ($\text{pH} = 7,23 \pm 0,12$). La même étude menée par Kapembo et al [4]. montre la même tendance, avec des valeurs de pH variant entre 6,1 et 7,2 durant la période de pluie: valeurs expliquées notamment par la nature des terrains traversés. Par ailleurs, des valeurs de pH acides ont été relevées par l'équipe d'Ahoudi [21], dans un travail réalisé sur les eaux de puits et de forages au Togo. Les auteurs trouvent des pH compris entre 5,73 et 6,18 pour les eaux de puits tandis que l'eau de forage exhibe un pH variant entre 5,82 et 7,04.

Les résultats de Conductivité sont en moyenne de $184,20 \pm 15,78$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau de puits et de $98 \pm 0,85$ $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour celle de la rivière. Ces valeurs sont non seulement conformes à la limite standard de l'OMS, mais aussi incluses dans l'intervalle des valeurs obtenues par Adejuwon et Mbuk [22] sur leur article portant sur les eaux de puits de Lagos au Nigéria. Les valeurs de Conductivité comprises entre 22 et 315 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ont été obtenues. Par contre, une plage de conductivité plus large (42,7 et 1406,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) est relevée par Yapo et al. sur l'étude de la qualité des puits de quelques quartiers d'Abidjan en Côte d'Ivoire [3]. De façon générale, une conductivité trop élevée traduit, soit des pH anormaux, soit le plus souvent une salinité élevée, qu'elle soit naturelle ou due à des rejets salins et pourrait induire une pollution par les métaux lourds [23]. Par contre, si la conductivité est trop faible, les eaux y sont très peu chargées en nutriments et en éléments minéraux.

Pour l'ensemble des prélèvements, l'Oxygène dissous présente des valeurs remarquablement bonnes, que ce soit au niveau des puits ou au niveau du cours d'eau, respectivement de $08,93 \pm 0,97$ et $7,57 \pm 0,39$ mg d' O_2/L , ces milieux sont donc bien oxygénés. Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs articles, dont les études ont été menées en régions tropicales [24]. D'après les auteurs, les hautes températures favorisent des valeurs faibles en O_2 dissous. L'oxygène dissous est un paramètre important à prendre en considération, car il renseigne sur l'état d'oxygénation des puits d'une part, et d'autre part favorise la croissance des micro-organismes qui dégradent la matière organique. En général, les valeurs faibles en oxygène dissous et donc proches de l'anaérobiose favorisent le développement des germes pathogènes et provoquent une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments.

La moyenne des puits indique une teneur en Matières en Suspension de $07,30 \pm 6,57$ mg/L contre $17,30 \pm 10,86$ mg/L pour la rivière (Cf. Figure 8/a). Ce qui traduit une bonne qualité des eaux pour ce paramètre. Les valeurs trouvées se situant dans la limite du seuil d'acceptabilité de l'OMS (25 à 38 mg/L de MES). Ces teneurs en MES dans les eaux des puits sont voisines de celles enregistrées par Gyamfi et al [25]., qui ont obtenu des valeurs en MES inférieures à 5 mg/L dans les eaux de certaines banlieues de la ville d'Accra au Ghana. Elles sont par ailleurs différentes de celles de Mbaka et al [26]. qui ont obtenus quant à eux des valeurs variant entre 30 et 200 mg/L de MES, dans les eaux de puits des hauts plateaux de Keiyo au Kenya. Cette différence serait due à la nature très différente des roches dans ces régions.

Les puits traditionnels montrent un niveau de salinité moyen de $61,14 \pm 48,60$ mg/L tandis que dans l'eau de la rivière, la teneur calculée est proche de $42,82 \pm 1,74$ mg/L (Cf. Figure 9/a), confirmant ainsi un niveau de charge saline conforme aux normes de qualité (salinité \leq à 300 ppm). Ces concentrations sont largement en-dessous de celles obtenues par Yapo et al [3]., dans l'article portant sur l'évaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique, dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan, en Côte d'Ivoire. Dans cet article, la charge saline totale dissoute des eaux souterraines est proche de 369,4 mg/L.

Les teneurs en espèces dissoutes: Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et le fer total contenus dans l'eau de puits/rievière sont en-dessous du seuil limite de pollution (100 en Ca^{2+} , 250 en Cl^- , 50 en NO_3^- , 400 en SO_4^{2-} , et 200 en Fe; exprimé en ppm de X^{n}). Les analyses effectuées montrent des proportions faibles et même négligeables, dans les deux écosystèmes étudiés (Cfs. Sections cations métalliques, X^{n} et le Fer total, Fe; et anions métalliques, X^{n}). Ce résultat pourrait être dû au fait que ces ions auraient subi une dilution durant la saison de pluie, comme l'expliquent certains auteurs [27].

Pour le titre calcique, la moyenne dans les puits se situe autour de $1,13 \pm 0,28$ mg/L et presque de moitié pour la rivière ($\text{Ca}^{2+} = 0,57 \pm 0,04$ mg/L), signe d'une absence de dureté permanente de l'eau, même si l'on devrait aussi mesurer la teneur en

ions Magnésium (Mg^{2+}) qui y contribue également avec le Ca^{2+} . Ce qui traduirait dans ce cas, la capacité des eaux à réagir avec du savon. Une eau dure exigerait beaucoup plus de savon pour produire de la mousse.

De même, les eaux étudiées ne sont pas chlorurées, (Cl^- varie de $37,1\pm 29,49$ mg/L dans les puits et $25,99\pm 1,06$ mg/L dans le ruisseau). Pour les puits, la valeur en Cl^- se rapproche de celle observée par Yapo et al [3], comprise entre $52,1\pm 13,9$ à $94,3\pm 69,5$ mg/L, dans les puits des quartiers de Treichville et Port-Bouet à Abidjan en Côte d'Ivoire.

Concernant les Nitrates, l'étude montre une moyenne de $0,08\pm 0,05$ mg/L sur les puits alors que la rivière donne une moyenne de $0,01\pm 0,01$ mg/L en NO_3^- , ce qui témoigne d'une absence de ce polluant dans les eaux. Lorsqu'ils sont en excès, les ions Nitrates sont responsables de l'eutrophisation des cours d'eau. Pour les ions Sulfates (SO_4^{2-}), ils sont présents à $4\pm 2,65$ mg/L dans les puits et quatre fois moins importants dans le ruisseau de Nzeng-Ayong Dragages ($SO_4^{2-} = 1$ mg/L), mais toujours en-dessous du seuil guide ($SO_4^{2-} \leq 400$ mg/L). Lagnika et al [28]. ont obtenu des valeurs nettement plus grandes ($6,62\pm 7,26$ mg/L de SO_4^{2-}) dans les puits de la capitale béninoise.

La concentration moyenne en Fer varie entre $0,46\pm 0,49$ mg/L pour l'eau de puits et $2,02\pm 1,33$ mg/L pour l'eau de rivière. Donc de teneur très insignifiante par rapport à la norme de l'OMS, 200 mg/L de Fer. Des valeurs proches de 0,22 mg/L ont été trouvées par Ahoudi et al [21], dans les eaux souterraines au Togo.

Finalement, aucune pollution des eaux n'est traduite par ces espèces chimiques, les valeurs trouvées sont quasi acceptables, en lien avec les directives de l'OMS. Par contre, les polluants chimiques que sont le Baryum et les Orthophosphates sont en quantité élevée dans ces eaux. Pour le Ba^{2+} , la moyenne est de $4,75\pm 1,71$ mg/L dans les puits et $4,33\pm 1,15$ mg/L dans le cours d'eau (Cf. Figure 10). La valeur limite fixée par la norme étant de 0,7 mg/L pour le Ba^{2+} . En accord avec l'ouvrage référencé ci-contre [29], aucune preuve que le Baryum soit cancérigène ou mutagène. La pollution par cet ion serait d'origine naturelle et accentuée par des effets anthropiques. S'agissant des ions PO_4^{3-} , leur teneur moyenne vaut respectivement $1,31\pm 1,13$ mg/L dans les puits et $2,77\pm 2,07$ mg/L dans le ruisseau, donc deux fois plus (valeur guide de l'OMS, ≤ 1 mg/L de PO_4^{3-}). La qualité de l'eau est donc médiocre vis-à-vis du paramètre PO_4^{3-} . Comme précédemment énoncé, les "water-closets, la buanderie à ciel ouvert, la station de lavage de véhicules..." érigés à cet endroit, contribueraient fortement à augmenter la teneur en Orthophosphates (Cf. Tableau 1). Des précédentes études rapportent que des hautes teneurs en PO_4^{3-} peuvent être associées à l'utilisation d'engrais et des détergents, et induiraient ainsi de graves conséquences écologiques [29]. Ce qui signifie qu'un excès en cet élément pourrait avoir des répercussions plutôt désastreuses sur la santé humaine. À cela s'ajouteraient les défauts d'assainissement et de collecte des ordures ménagères, au transfert de polluants à partir des couches superficielles du sol, aux conditions de puisage et à la structure des ouvrages de collecte d'eau [2, 3]. In fine, pour ces deux indicateurs, les eaux du puits incriminé et le cours d'eau sont donc impropres à toute consommation avant traitement. Par conséquent, les populations locales utilisant les eaux provenant de ces ressources devraient en être avisées, quant aux conséquences encourues dans le long terme.

Les résultats d'analyses ont également montré que l'utilisation de l'eau de Javel a un effet positif sur la concentration de certains polluants: elle diminue aussi bien la teneur en cations (Cf. Figure 10/b) que celle des anions, tels que: PO_4^{3-} et SO_4^{2-} (Cf. Tableau 5), et concomitamment augmente le taux de minéralisation de l'eau (Cf. Figure 9/b). Par contre, pour les Matières en Suspension et les Nitrates (Cfs. Figure 8/b et Tableau 5), on remarque un effet plutôt négatif; effet se traduisant par une augmentation de la quantité de ces polluants suite à l'ajout de la Javel sur l'eau naturelle. D'autres auteurs [30, 1] ont étudié l'impact de la chloration sur l'étape de désinfection des eaux de puits. Ils se sont intéressés à la détermination de la demande en Chlore permettant d'obtenir un effet bactéricide, dose variant entre 0.6 et 3.5 mg/L de Chlore, selon l'article. En revanche, les auteurs n'ont pas mesuré la teneur en polluants chimiques après l'étape de chloration. Ce qui sans nul doute, ne permet pas d'établir des comparaisons avec les résultats donnés par la présente étude. L'effet 'négatif' de NaOCl sur la teneur en MES/Nitrates constitue donc une première approche qui pourra être enrichie par d'autres études, afin de mieux comprendre la différence observée.

5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'eau est un bien précieux indispensable à la survie des êtres vivants. Pourtant, cette ressource se trouve fortement menacée de jour en jour par la pollution dite anthropique. L'étude de la qualité des eaux a été évaluée en utilisant les paramètres globaux d'analyses physico-chimique. Elle révèle que la plupart des indicateurs de qualité physiques des eaux de puits et de la rivière parcourant le quartier de Nzeng-Ayong Dragages, sont conformes à la limite de qualité fixée par les normes environnementales. La moyenne de pH des eaux de puits a tendance à être acide tandis que celle des eaux du ruisseau dénote un caractère plutôt neutre. Les valeurs de Conductivité électrique et d'Oxygène dissous traduisent une eau de bonne qualité et particulièrement bien oxygénée.

Les Matières en Suspension et la Salinité de l'eau présentent des valeurs favorables à un état écologique acceptable et favorisant ainsi une minéralisation des eaux. Mais encore, les résultats de spectrophotométrie montrent que les eaux provenant de ces deux types de sources d'approvisionnement sont peu ou pas du tout polluées par les espèces chimiques que sont: Ca^{2+} , Cl^- , Fe , NO_3^- , PO_4^{3-} (trois puits sur les quatre échantillonnés) et SO_4^{2-} . Exception faite pour les ions Baryum, qui montrent une pollution six fois plus importante que la valeur de référence, et une pollution par les ions PO_4^{3-} , contenus à la fois dans la rivière et dans l'un des puits étudiés (puits N° 2). La teneur élevée en Ba^{2+} pourrait s'expliquer non seulement par la nature des couches géologiques du terrain, mais également par les rejets domestiques au niveau du site d'échantillonnage. Néanmoins, dans cette zone, des études plus approfondies avec un échantillonnage encore plus grand devraient être menées pour mieux comprendre cette augmentation de la concentration en ions Baryum. Pour les Phosphates, cela serait probablement dû à l'emploi des détergents et autres pesticides fortement utilisés lors des lessives et l'arrosage des sols potagers.

Mieux encore, on remarque que l'ajout d'eau de Javel à l'eau de la ressource, a un effet plutôt bénéfique sur la réduction de la concentration de certains ions (Ba^{2+} , Ca^{2+} , Fe , PO_4^{3-} et SO_4^{2-}). Ce traitement chimique est donc recommandé pour les ménages vivant dans les conditions où, l'adduction en eau potable par les services compétents, est encore une réelle utopie.

Par contre, pour les ions Chlorures et Nitrates (Cl^- et NO_3^-), on constate un effet inverse et additif. L'hypochlorure de sodium augmente la quantité de ces deux espèces ioniques dans l'eau. Ce qui ne s'avère pas du tout gênant pour les Chlorures, du point de vue de la nuisance sur la santé humaine. Cependant, il faut quand même dire qu'un excès en Cl^- aurait plutôt tendance à donner à l'eau une sensation de goût salé. Par contre, pour les Nitrates, une quantité trop élevée pourrait induire le phénomène bien connu d'eutrophisation des cours d'eau.

In fine, cet article qui s'est uniquement focalisé sur le volet physico-chimique des eaux de puits/rivière, pourra être complété par des tests microbiologiques complémentaires, en mettant l'accent sur les agents pathogènes retrouvés dans les milieux aquatiques. En tenant compte de l'augmentation du nombre d'échantillons d'un part, et de la variabilité saisonnière d'autre part, l'étude permettra une évaluation plus exhaustive des ressources en eau de la ville de Libreville, dans une optique de fournir à la population locale des données d'une eau de 'qualité saine'. Enfin, les résultats relevés par ce travail pourront être utiles aux pouvoirs publics gabonais dans sa prise de décision quant' à l'amélioration du cadre de vie de ses concitoyens; par la fourniture en temps réel, d'infrastructures d'adduction et d'assainissement en eau potable. Car, en dépit des valeurs des paramètres analysés, qui restent pour la plupart dans la fourchette des normes requises par l'Organisation Mondiale de la Santé, il n'en demeure pas moins que ces sources d'eau constituent des foyers potentiels d'une pollution en tout genre...

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique du Gabon, par l'entremise du Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST) qui encadre les activités des Chercheurs. Que l'équipe de "*Environmental and Water Resources Engineering*" de l'Université de Michigan USA, trouve ici notre gratitude, pour ses conseils et son implication dans le domaine de recherche en qualité des eaux, au niveau des pays en voie de développement, notamment en territoire gabonais. Enfin, les auteurs remercient les collaborateurs du Département de Biologie de l'Université des Sciences et Techniques de Masuku (USTM) et du Département de Chimie de l'École Normale Supérieure (ENS) pour leur relecture respective, indispensable à l'aboutissement de ce Manuscrit.

REFERENCES

- [1] L. Tampo, M. Ayah, T. Kodom, I. Tchakala, P. Boguido, L. Bawa, and B. Djaneye, "Impact de la demande en chlore et de la chloration sur la désinfection des eaux de puits des quartiers de Lomé: cas des quartiers de Démakpoé et d'Adbalépédogan (Togo)", *Journal of Applied Biosciences*, vol. 75, pp. 6272-6281, 2014.
- [2] J. P. Chippaux, S. Houssier, P. Gross, C. Bouvier, and F. Brissaud, "Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger", *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique*, vol. 95, no. 12, pp. 119-123, 2002.
- [3] O. B. Yapo, V. Mambo, A. Seka, M.-J. A. Ohou, F. Konan, V. Gouzile, A. S. Tidou, V. Kouame, and P. Houenou, "Évaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire): Koumassy, Marcory, Port-Bouet et Treichville", *International Journal of Biology and Chemistry Science*, vol. 4, no. 12, pp. 289-307, 2010.
- [4] M. L. Kapembo, A. Laffite, M. K. Bokolo, A. L. Mbang, M. M. Maya-Vanga, and J. Oté, "Évaluation of water quality from suburban shallow wells under tropical conditions according to the seasonal variation, Bumbu, Kinshasa, Democratic Republic of the Congo", *Exposure and Health*, vol. 8, no. 14, 2016.
- [5] P. I. Kilunga, J. M. Kayembe, A. Laffite, F. Thevenon, N. Devarajan, C. K. Mulaji, J. L. Mubedi, Z. G. Yav, J-P. Otamonga, P. T. Mpian, and J. Oté, "The impact of hospital and urban wastewaters on the bacteriological contamination of the water resources in Kinshasa, Democratic Republic of Congo", *Journal of the Environmental Science and Health*, vol. 51, no. 12, pp. 1034-1042, 2016.
- [6] P. M. Mwanamoki, N. Devarajan, and B. Niane, "Trace metal distributions in the sediments from river-reservoir systems: case of the Congo River and Lake Ma Vallée, Kinshasa (Democratic Republic of Congo)", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, no. 11, pp. 586-597, 2015.
- [7] E. Rochelle-Newall, T. M. Nguyen, O. Sengtaheuanghoung, and O. Ribolzi, "A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions", *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, pp. 308, 2015.
- [8] J. I. Mubedi, N. Devarajan, S. L. Fauchneur, J. K. Mputu, E. K. Atibu, and J. Oté, "Effects of untreated hospital effluents on the accumulation of toxic metals in sediments of receiving system under tropical conditions: Case of South India and Democratic Republic of Congo", *Chemosphere*, vol. 93, no. 16, pp. 1070-1076, 2013.
- [9] J. Poté, L. Haller, J. L. Loizeau, A. Garcia Bravo, V. Sastre, and W. Wildi, "Effets of a sewage contaminants treatment plant outlet pipe extension on the distribution of contaminants in the sediments of the Bay of Vidy, Lake Geneva, Switzerland", *Bioresource Technology*, vol. 99, no. 115, pp. 7122-7131, 2008.
- [10] V. Gbohaida, D. C. P. Agbangnan, M. B. Ngossanga, S. E. Medoatinsa, L. F.-C. Dovonon, D. V. Wotto, F. Avlessi, and D. C. Sohounhloue, "Étude de la qualité physico-chimique de l'eau de boisson dans deux localités du Bénin: Cotonou et Dassa-Zoumé", *International Biology and Chemistry Science*, vol. 10, no. 11, pp. 422-434, 2016.
- [11] L. Matini, J.-M. Moutou, and M. S. Kongo, "Évaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazaville, Congo", *Afrique Science*, vol. 5, no. 11, 2009.
- [12] S. Hébert, and S. Légaré, "Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau", *Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'Environnement*, no. ENV-2001-0141, Rapport no. QE-123, p24, Québec, 2000.
- [13] AFNOR, *Guide de prélèvement pour le suivi de la qualité des eaux dans l'Environnement-Partie I: prélèvement d'eau de surface*, Agence Française de Normalisation, FD T90-523-1, 2008.
- [14] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and wastewater*, 21st Ed. American Public Health Association, Washington DC, 2005.
- [15] J. Rodier, *L'analyse de l'eau*, 8th Ed. DUNOD, Paris, p1384, 1994.
- [16] D. Keddari, "Mise au point des techniques de mesure de la DBO5, des formes azotées et des paramètres physiques des eaux superficielles", *Mémoire de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Gestion durable des Écosystèmes et Protection de l'Environnement, Université des Frères Mentouri Constantine*, p53, 2015.
- [17] C. D. Creuse, "La qualité des eaux des cours d'eau en Creuse", *Conseil Départemental de la Creuse*, p48, 2017.
- [18] ABH, "Emergong issues in water and infectious disease", 2009.
- [19] WHO, "Guidelines for drinking water quality", 3rd Ed. Geneva, 2003.
- [20] B. Zouag et Y. Belhadj, "Analyse physico-chimique, bactériologique et parasitologique de l'eau de mer traitée par la station de dessalement de Souk Tleta 'Tlemcen'", 2017.
- [21] H. Ahoudi, K. Ghandi, G. Tanouayi, and K. Ouro-Sama, "Caractérisation physico-chimique et état de pollution par les éléments de traces métalliques des eaux souterraines de Lomé (Sud Togo): cas du quartier Agoe Zongo", *Larhyss Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 41-56, 2015.
- [22] J. O. Adejuwon, and C. J. Mbuk, "Biological and physicochemical properties of shallow wells in Ikorodu town, Lagos Nigeria", *Journal of Geology and Mining Research*, vol. 3, no. 16, pp. 161-168, 2011.

- [23] F. Z. Mehennaoui-Afri, "Contribution à l'étude physico-chimique et biologique de l'Oued Kébir-Rhumel et de ses principaux affluents", Mémoire de Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Gestion durable des Écosystèmes et Protection de l'Environnement, Université des Frères Mentouri Constantine, p68, 2015, 1998.
- [24] M. M. Ali, M. L. Ali, M. S. Islam, and M. Z. Rahman, "Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh", *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, vol. 5, pp. 27-35, 2016.
- [25] E. T. Gyamfi, M. Ackah, A. K. Anim, J. K. Hanson, L. Kpattah, S. Enti-Brown, Y. Adjei-Kyereme, and E. S. Nyarko, "Chemical analysis of potable water samples from selected suburbs of Accra, Ghana", *International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 2, no. 2, pp. 118-127, 2012.
- [26] P. K. Mbaka, J. K. Mwangi, and C. K. Kiptum, "Assessment of water quality in selected shallow wells of Keiyo Highlands, Kenya", *African Journal of Science Technology Innovation and Development*, vol. 9, no. 3, pp. 1-10, 2017.
- [27] P. Lilly Florence, A. Paulraj, and T. Ramachandramoorthy, "Water quality index and correlation study for the assessment of water quality and its parameters of Yercaud Taluk, Salem District, Tamil Nadu, India", *Chemical Science Transactions*, vol. 1, no. 1, pp. 139-149, 2012.
- [28] M. Lagnika, M. Ibikounle, J.-P. C. Montcho, V. D. Wotto, and N. G. Sakiti, "Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'Ouest)", *Journal of Applied Biosciences*, vol. 79, pp. 6887-6897, 2014.
- [29] CAWST, "Introduction à l'Analyse Qualité de l'Eau de Boisson", Centre for Affordable Water and Sanitation Technology, p197, 2013.
- [30] L. M. Bawa, L. Tchakala, and G. Djanéyé-Bouindjou, "Détermination de la demande en chlore des eaux de puits et de forages d'un quartier périurbain de la ville de Lomé: incidence sur la désinfection", *Journal des Sciences et Technologie*, vol. 7, no. 2, pp. 19-24, 2008.