



Caractérisation physicochimique et microbiologique des eaux de puits à usage de boisson de la ville d'Aboisso (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

Thierry Oscar SEKI^{1,2*}, Wolfgang Toussaint YAPO¹, Sawa André Philippe KPAIBÉ^{1,2}, Djedjro Franck Renaud MELESS^{1,2} et N'cho Christophe AMIN^{1,2}

¹Laboratoire des Eaux et Aliments, Institut National d'Hygiène Publique, Abidjan, Côte d'Ivoire.

²Département des Sciences Analytiques et Santé Publique, UFR Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant ; E-mail: thierry_seki@yahoo.fr ; cel : +225 07 07 04 19 70.

Received: 21-12-2023

Accepted: 19-02-2024

Published: 29-02-2024

RESUME

L'eau de boisson doit être potable. Cependant, dans la ville d'Aboisso, la qualité des eaux souterraines, captées par des puits creusés et utilisées comme alternative usuelle à l'eau du réseau public par plusieurs ménages, est mal connue. Ainsi, cette étude visait à évaluer les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques d'eaux de puits à usage de boisson. Pour ce faire, 89 puits ont fait l'objet d'une inspection sanitaire suivie d'un contrôle de la qualité physicochimique et microbiologique de leurs eaux. Dans l'ensemble, les eaux analysées étaient acides (94,38%), moyennement minéralisées (61,80%) et douces (62,92%). La contamination physicochimique était soulignée par une turbidité et un taux de fer élevés, respectivement dans 67,42% et 51,69% des échantillons d'eau. Une proportion de 68,54% des puits présentaient une source de pollution dans un rayon de 15 m et 86,52% d'échantillons d'eau étaient contaminés microbiologiquement. Par ailleurs, une analyse en composantes principales et une classification ascendante hiérarchique ont réparti les puits en trois groupes dont le dominant (74,16%) était constitué par des puits ayant de faibles valeurs des différents paramètres analysés. Les ménages, avant de consommer ces eaux souterraines contaminées et continuellement exposées à la pollution, doivent convenablement les traiter.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Eaux souterraines, contrôle qualité, inspection sanitaire, pollution, classification ascendante hiérarchique.

Physicochemical and microbiological characterization of well water for drinking purposes in the town of Aboisso (South-East of Ivory Coast)

ABSTRACT

Drinking water must be safe. However, in the town of Aboisso, the quality of groundwater, captured by dug wells and used as a usual alternative to public network water by several households, is poorly known. Thus, this study aimed to evaluate the physicochemical and microbiological characteristics of well water for drinking purposes. To do this, 89 wells were subject to a sanitary inspection followed by a control of the physicochemical and microbiological quality of their waters. Overall, the waters analyzed were acidic (94.38%), moderately mineralized (61.80%) and soft (62.92%). High turbidity and iron levels, respectively in 67.42% and 51.69% of the water samples, highlighted physicochemical contamination. A proportion of 68.54% of wells presented a

source of pollution within a radius of 15 m and 86.52% of water samples were microbiologically contaminated. Furthermore, a principal component analysis and an ascending hierarchical classification divided the wells into three groups, the dominant of which (74.16%) was made up of wells with low values of the different parameters analyzed. Households, before consuming this contaminated groundwater continually exposed to pollution, must properly treat it.

© 2024 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Groundwater, quality control, sanitary inspection, pollution, ascending hierarchical classification.

INTRODUCTION

L'eau est indispensable à toutes les formes de vie. Elle remplit des fonctions de transport, de santé, d'habitat, de production et de culture. Ses usages pour l'homme sont multiples, mais trois grandes catégories d'usages sont généralement mises en avant : les usages domestiques, les usages industriels et les usages agricoles (Anctil, 2016). Les usages domestiques de l'eau comprennent, entre autres, la boisson, la préparation des repas, l'hygiène personnelle et domestique. L'eau destinée à la boisson doit être potable de sorte à pouvoir être bue toute la vie sans risque pour la santé (OMS, 2017). En effet, l'eau de boisson non potable peut véhiculer des maladies d'origine chimique ou microbiologique (Sognon et al., 2022).

Dans le monde, environ 829 000 personnes meurent chaque année de diarrhées imputables à un manque d'eau potable, d'assainissement et d'hygiène des mains (ONU, 2021). En Afrique, ce chiffre est estimé à 2670 décès quotidiens (Abubakar, 2019). En Côte d'Ivoire, selon le Ministère de la Santé, de l'Hygiène Publique et de la Couverture Maladie Universelle (MSHPCMU, 2021), l'incidence de la diarrhée était de 61,31% chez les enfants de moins de 5 ans et de 17,76% dans la population générale en 2020.

L'accès des populations à de l'eau potable peut contribuer à la réduction des maladies à transmission hydrique. Il supprimerait 30% des diarrhées aiguës de l'enfant qui sont une cause majeure de mortalité dans les régions défavorisées du monde (Klotz, 2010). Conscient de ce fait, l'Etat de Côte d'Ivoire a doté plusieurs villes du pays de systèmes d'hydraulique urbaine pour l'approvisionnement en eau potable des populations. Toutefois, malgré la mise à disposition d'une adduction en eau potable,

certaines populations consomment encore de l'eau de puits. Dans la région du Sud-Comoe dont le chef-lieu est le département d'Aboisso, l'eau de puits est utilisée comme source principale d'eau de boisson par 36,5% des ménages (INS, 2017). Les quelques études effectuées sur les eaux de cette région telles que celles d'Amin et al. (2019) et d'Assouman et al. (2020) ne se sont pas focalisées sur la qualité des eaux de puits dans la ville d'Aboisso. Pourtant, dans ladite ville, Niamké (2016) a mis en évidence une dégradation de l'environnement marquée par des sites de rejets de déchets non contrôlés, des incinérations continues de déchets, des rejets de déchets dans les plans d'eau et un assainissement défaillant, le tout impactant négativement la santé de la population (paludisme, diarrhée) et susceptible de contaminer les eaux souterraines notamment les aquifères d'altérites.

Au regard du danger que représente la consommation d'une eau contaminée et de l'insuffisance de données sur les eaux de puits de la ville d'Aboisso, la présente étude a été initiée avec pour objectif d'évaluer la qualité physicochimique et microbiologique des eaux de puits à usage de boisson.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

La ville d'Aboisso est située dans le sud-est de la Côte d'Ivoire à 116 km d'Abidjan, sur l'axe Abidjan – Noé (Figure 1). La commune d'Aboisso a une population estimée à 100 903 habitants selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2021, soit 23098 ménages. Le réseau hydrographique de la ville est marqué par la présence de la rivière BIA. Le climat de type subéquatorial, marqué par deux saisons pluvieuses alternant avec deux saisons sèches d'inégales durées, est caractérisé par une température moyenne annuelle variant de 25°C à 33°C, une hauteur

de pluie annuelle de 1400 à 2500 mm et un taux d'humidité de l'ordre de 80 à 90% sur l'année. Les sols de la ville sont essentiellement de type ferrallitique fortement désaturé et de type hydromorphe à gley et pseudogley (Ake et al., 2019).

Echantillonnage

Les données ont été collectées de février à mars 2022, en fin de saison sèche. Quarante-neuf (49) puits à usage de boisson répartis dans plusieurs quartiers de la ville d'Aboisso ont fait l'objet d'une inspection sanitaire et un échantillon d'eau a été prélevé par puits en vue de contrôler sa qualité physicochimique et microbiologique. Les échantillons destinés aux analyses physicochimiques ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1000 ml remplis à ras bord et ceux destinés aux analyses microbiologiques dans des flacons de 500 ml faits de la même matière et remplis environ aux 2/3. Les échantillons ont été conservés à l'abri de la lumière et à une température comprise entre 4°C et 8°C dans une glacière jusqu'au laboratoire où les analyses ont été faites dans les 8 heures.

Inspection sanitaire

Un formulaire d'inspection sanitaire élaboré sur "Google forms" a servi à collecter via des smartphones les données sur les sources de pollution des puits (distances des puits aux latrines ou fosses septiques, dépotoirs d'ordures, eaux usées, fèces). Ces données ont été stockées en ligne sur "Google forms". La méthode d'inspection a combiné des observations de terrain à un entretien avec les propriétaires des puits. Un GPS (Global Positioning System) a été utilisé pour prendre les coordonnées des puits et un mètre ruban a été employé pour mesurer les distances entre les puits et les sources de pollution.

Analyses physicochimiques

Quatre paramètres physiques désignés par le pH, la conductivité, la température et la turbidité ont été mesurés in situ. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre HANNA® HI 991003 par la méthode électrochimique à l'électrode de verre. La conductivité et la température ont été déterminées avec un conductimètre

HANNA® HI 98192 par la méthode électrochimique à l'électrode de titane, et la turbidité au moyen d'un turbidimètre HANNA® HI 98713 par la méthode néphélométrique.

Au laboratoire, la couleur et treize (13) paramètres chimiques ont été mesurés. Un spectrophotomètre HACH® DR 3900 a été utilisé pour doser la couleur par la méthode au platine – cobalt, l'ammonium (NH_4^+) par la méthode au salicylate, les chlorures (Cl^-) par la méthode du thiocyanate de mercure, le fer total (Fe) par la méthode ferroVer, le manganèse (Mn^{2+}) par la méthode d'oxydation au périodate et le zinc (Zn^{2+}) par la méthode au zincon. La méthode à l'aluminon a été utilisée pour le dosage de l'aluminium (Al^{3+}) et celle au SPADNS pour les fluorures (F^-). Le cuivre (Cu^{2+}) a été dosé par la méthode au bicinchoninate, les nitrates (NO_3^-) par réduction au cadmium et les nitrites (NO_2^-) par diazotation. Le DHT, le TAC et la matière organique ont été dosés par titrimétrie (Rodier et al., 2009).

Analyses microbiologiques

Quatre paramètres microbiologiques (*Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, anaérobies sulfite-réducteurs (ASR), et *Pseudomonas aeruginosa*) ont été recherchés et dénombrés au laboratoire. Le matériel de microbiologie était composé essentiellement d'une rampe de filtration à trois postes et de ses accessoires, de boîtes de petri de diamètres 55 mm et 90 mm, d'un bain-marie, d'étuves à 37°C et 44°C, de membranes de filtration de diamètre de pores de 0,45 µm et de diverses géloses. Les géloses utilisées étaient RAPID'E.coli 2 pour *E. coli*, la gélose BEA (Bile Esculine Agar) pour *E. faecalis*, la gélose cétrimide pour *P. aeruginosa* et la gélose TSN (Tryptone Sulfite Néomycine) pour les ASR. Les bactéries *E. coli*, *E. faecalis* et *P. aeruginosa* ont été identifiées et dénombrées par la méthode de filtration sur membrane respectivement selon les normes NF EN ISO 9308-1, NF ISO 7899-2 et NF EN ISO 16266 (Rodier et al., 2009). L'identification et le dénombrement des ASR ont été faits selon la méthode par incorporation en gélose (Rodier et al., 2009).

Analyse des données

Les logiciels Microsoft Excel 2016 et RStudio version 2023.03.0 pour Windows ont été utilisés pour effectuer des analyses descriptives et des tests statistiques. Les cartes thématiques ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcGis 10.8.

Les fréquences de présence de sources de pollution dans l'environnement des puits ont été calculées à l'aide d'Excel. Des boîtes à moustaches et le test non paramétrique de Wilcoxon réalisés sur RStudio ont permis d'évaluer l'influence de la distance entre les sources de pollution et les puits sur la qualité microbiologique de l'eau.

Les minimums, les maximums, les moyennes \pm écarts types des paramètres physicochimiques et microbiologiques, de même que les effectifs et les pourcentages de non-conformités par rapport aux normes de l'OMS (OMS, 2017), ont été déterminés avec

Excel. Les classifications des eaux selon la conductivité et la dureté ont été basées sur les échelles proposées par Rodier et al. (2009) et Okonkwo (2015). Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à l'aide de RStudio après vérification de la pertinence de son utilisation à travers le test de sphéricité de Bartlett et le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) (Bourque et al., 2007). L'ACP, appliquée à 89 descripteurs (puits) et à 22 variables, a permis de déterminer les relations entre les variables et d'identifier les facteurs à l'origine de la composition physicochimique et microbiologique des eaux. Se basant sur le critère de Kaiser (Bourque et al., 2007), seules les dimensions dont les valeurs propres étaient supérieures à 1 ont été retenues pour réaliser l'ACP. Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a ensuite permis de clustériser les puits.

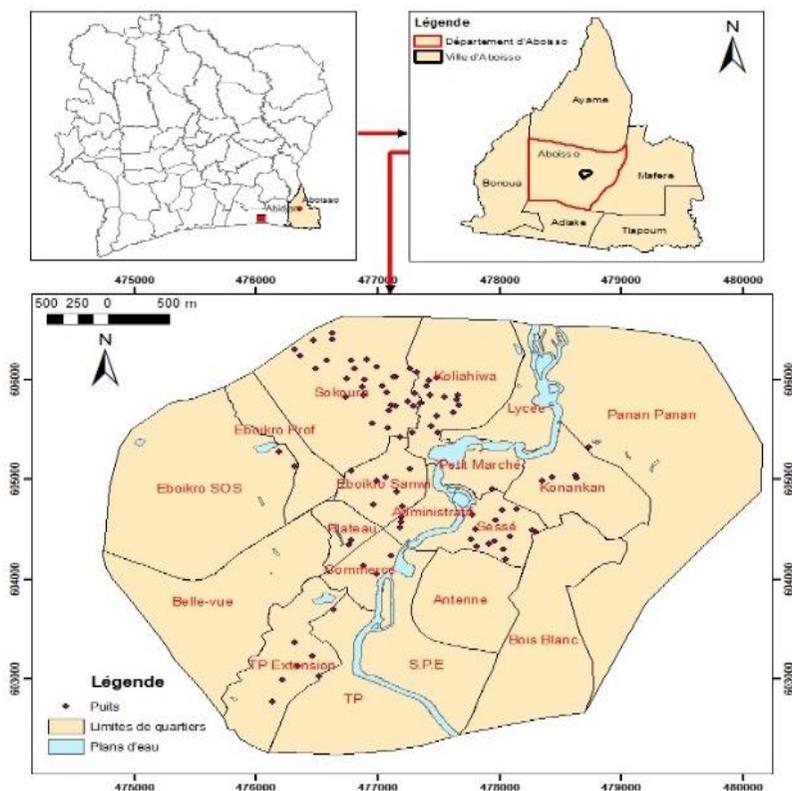


Figure 1 : Carte de localisation de la ville d'Aboisso.

RESULTATS

Sources de pollution environnementale

Sur les 89 puits investigués, 50,56% étaient situés à moins de 15 m d'une latrine / fosse septique. Cependant, 17,98% des puits, bien que situés à plus de 15 m d'une latrine / fosse septique présentaient dans un rayon de 15 m une autre source de pollution telle que des dépôts d'ordures ou des eaux usées (Figure 2). La comparaison des concentrations de bactéries dans les puits présentant une source de pollution apparente (latrine, eaux usées, ordures, dépotoirs) dans un rayon de 15 m ($n = 61$) à celles des puits sans source de pollution ($n = 28$) a montré des différences non significatives avec des p-valeurs de 0,71 pour *E. coli*, de 0,73 pour *E. faecalis*, de 0,65 pour les ASR et de 0,57 pour *P. aeruginosa* au seuil de significativité $\alpha = 0,05$ (Figure 3).

Caractérisation des échantillons

Conductivité, DHT et pH

Les résultats ont révélé des valeurs de conductivité correspondant à des minéralisations très faibles à importantes. La majorité des échantillons avaient des minéralisations moyenne (31,46%) et moyenne accentuée (30,34%) (Tableau 1). Les valeurs du DHT ont indiqué que la majorité des échantillons se répartissaient entre les eaux douces (62,92%) et les eaux modérément dures (23,60%). Quant au pH, il était acide pour la grande majorité des échantillons (94,38%).

Conformité des échantillons à la norme

Les analyses ont montré que l'ensemble des échantillons étaient non conformes à la norme car ayant au moins un paramètre non conforme. Au plan physicochimique, aucun échantillon n'était conforme à la norme. Le pH, la turbidité, le fer total et la couleur étaient par ordre d'importance les paramètres physicochimiques les plus mis en cause (Tableau 2). Le pH était non conforme pour 94,38% des échantillons, la turbidité pour 62,92% et le fer total pour 51,69% des échantillons. Les valeurs de la couleur étaient supérieures à la norme (15 UCV) pour environ un quart des échantillons (24,72%). Par contre, au plan microbiologique, 13,48% des

échantillons étaient conformes. La contamination microbiologique était marquée par la présence d'*E. faecalis*, d'*E. coli* et de *P. aeruginosa* respectivement dans 64,04%, 62,92% et 48,31% des échantillons.

Corrélation des paramètres physicochimiques et microbiologiques

L'examen de la matrice de corrélation des paramètres (Tableau 3) permet de faire quelques observations majeures. La turbidité avait une corrélation positive avec la couleur ($r = 0,85$), le fer total ($r = 0,75$), le manganèse ($r = 0,69$), l'aluminium ($r = 0,57$), les nitrates ($r = 0,56$) et le cuivre ($r = 0,53$). De même, outre la turbidité, la couleur avait une corrélation positive avec le fer total ($r = 0,68$), le cuivre ($r = 0,54$), la matière organique ($r = 0,51$) et le manganèse ($r = 0,50$). La conductivité avait une corrélation positive avec les chlorures ($r = 0,75$) et le DHT ($r = 0,71$) alors que les nitrates étaient corrélés positivement avec le manganèse ($r = 0,79$), le cuivre ($r = 0,66$) et la matière organique ($r = 0,55$). Le cuivre, en plus d'être corrélé avec les nitrates, la couleur et la turbidité l'était aussi avec le manganèse ($r = 0,74$) et la matière organique ($r = 0,58$).

Regroupement des variables d'après l'ACP

Les résultats de l'ACP ont montré que les trois premières dimensions représentaient 50,92% de la variance totale.

La dimension 1 (Dim 1) était définie par ordre d'importance par la couleur, la turbidité, la matière organique, les nitrates, le manganèse, le fer total, *E. coli* et *E. faecalis* qui étaient corrélés positivement dans le plan factoriel Dim1 x Dim2 (Figure 4a). Cette dimension regroupait des paramètres de pollution qui affectent l'aspect de l'eau et sa qualité microbiologique.

La dimension 2 (Dim 2) était gouvernée par le DHT, la conductivité électrique, le TAC et le pH qui étaient corrélés positivement dans le plan factoriel Dim1 x Dim2 (Figure 4a). Cette dimension était ainsi commandée par des paramètres qui définissent la minéralisation de l'eau.

La dimension 3 (Dim 3) était commandée par les chlorures et la conductivité

dans sa partie positive et dans sa partie négative par *E. faecalis* et *E. coli* (Figure 4b). La partie négative de la dimension 3 se rapportait aux paramètres de pollution fécale des eaux tandis que sa partie positive, tout comme la partie positive de la dimension 2, renvoyait à des paramètres de minéralisation des eaux.

Regroupement des puits par la classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique a montré trois classes ou clusters de puits : le cluster 1, le cluster 2 et le cluster 3 (Figure 5). Ils comptaient respectivement 74,16%, 16,85% et 8,99% des puits. Le cluster 1 regroupait des puits avec de faibles valeurs de DHT, TAC, conductivité, pH, NO₃⁻, matière

organique, couleur, turbidité, *E. faecalis*, *E. coli*, Mn²⁺ et Fe, les paramètres étant rangés de celui avec la plus faible valeur à celui avec la moins faible. Le cluster 2 avait de fortes valeurs de DHT, TAC, conductivité et pH. Quant au cluster 3, il avait des valeurs élevées de couleur, nitrates, turbidité, matière organique, Mn²⁺, Fe, *E. coli* et *E. faecalis*. Les puits du cluster 1 étaient disséminés dans toute la ville (Sokoura, Koliahiwa, Eboibro Sanwi, Eboikro SOS, Sessé et TP Extension). Les puits du cluster 2 étaient localisés dans les quartiers Sokoura, Administratif, Commerce et Eboikro Sanwi et ceux du cluster 3 majoritairement dans le quartier Konankan (Figure 6).

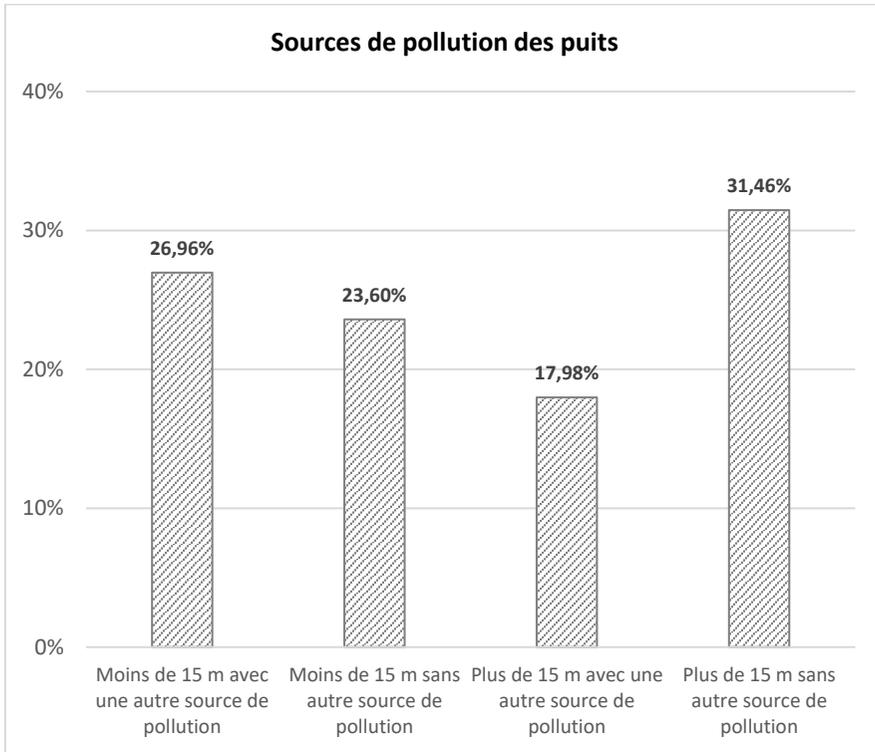


Figure 2 : Répartition en pourcentage des puits selon la distance à la latrine / fosse septique la plus proche et la présence ou non d’une autre source de pollution.

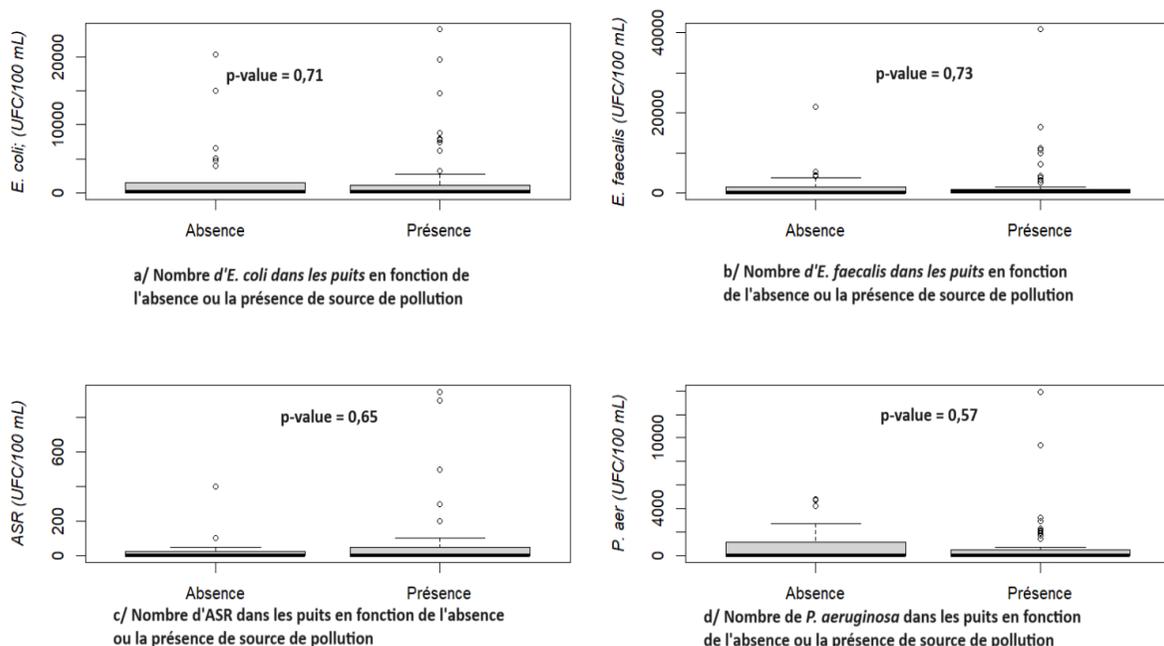


Figure 3 : Box-plot du nombre de bactéries dans les puits en fonction de la présence ou absence de pollution (Wilcoxon, $\alpha = 0,05$).

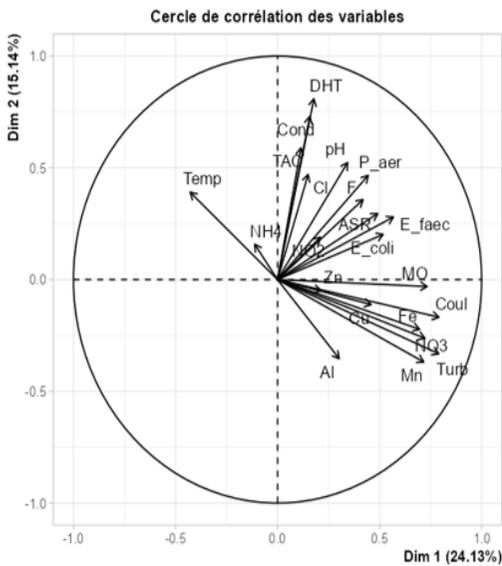
Tableau 1 : Répartition des eaux selon la minéralisation.

Valeurs de conductivité	Type de minéralisation	Effectif	Pourcentage (%)
Cond \leq 100	Minéralisation très faible	5	5,62
100 < Cond \leq 200	Minéralisation faible	21	23,60
200 < Cond \leq 333	Minéralisation moyenne	28	31,46
333 < Cond \leq 666	Minéralisation moyenne accentuée	27	30,34
666 < Cond \leq 1000	Minéralisation importante	8	8,99
Cond > 1000	Minéralisation élevée	0	0

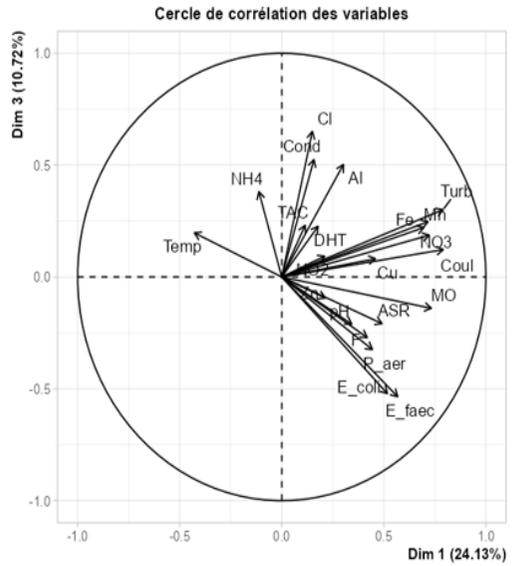
Tableau 2 : Statistiques descriptives des paramètres de qualité de l'eau.

Paramètre	Unité	Min	Moy \pm ET	Max	Non-conformités		Norme OMS (2017)
					n	%	
Temp	°C	26,0	28,49 \pm 0,66	30,0	-	-	-
pH	-	4,06	5,44 \pm 0,61	7,73	84	94,38	\geq 6,5 et \leq 8,5
Cond	(μ S/cm)	65,88	335,18 \pm 207,68	940,6	-	-	-
Turb	UTN	0,89	20,06 \pm 27,71	159,0	60	67,42	4
Coul	UCV	5	16,24 \pm 9,84	75	22	24,72	\leq 15
NO ₂ ⁻	mg/l	0	0,038 \pm 0,081	0,725	0	0	3

NO ₃ ⁻	mg/l	0,6	11,67 ± 19,78	149,1	4	4,49	50
NH ₄ ⁺	mg/l	0	0,71 ± 1,48	10,30	13	14,61	1,5
Cl ⁻	mg/l	2,2	26,02 ± 13,06	48	0	0	250
MO	mg/l O ₂	0,76	4,40 ± 5,95	28,40	10	11,24	5
Mn ²⁺	mg/l	0	0,055 ± 0,091	0,721	11	12,36	0,100
F ⁻	mg/l	0	0,17 ± 0,29	1,47	0	0	1,5
Fe	mg/l	0,06	0,44 ± 0,44	2,60	46	51,69	0,3
Zn ²⁺	mg/l	0	0,09 ± 0,10	0,48	0	0	3
Cu ²⁺	mg/l	0	0,09 ± 0,13	0,62	0	0	2
DHT	mg/l	8	66,30 ± 49,53	218	0	0	500
TAC	mg/l	5	20,84 ± 13,19	65	-	-	-
Al ³⁺	mg/l	0,01	0,062 ± 0,105	0,72	6	6,74	0,2
<i>E. coli</i>	UFC/100 ml	0	2062 ± 4629	24000	56	62,92	< 1
<i>E. faec</i>	UFC/100 ml	0	2027 ± 5493	40800	57	64,04	< 1
ASR	UFC/100 ml	0	57 ± 164	950	24	26,97	< 1
<i>P. aer</i>	UFC/100 ml	0	812 ± 1999	13920	43	48,31	< 1



a. Dimensions 1 et 2



b. Dimensions 1 et 3

Figure 4 : Cercles de corrélation des variables dans les dimensions.

Tableau 3 : Matrice de corrélation des paramètres physicochimiques et microbiologiques.

	Temp	pH	Cond	Turb	Coul	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	MO	Mn ²⁺	F ⁻	Fe	Zn ²⁺	Cu ²⁺	DHT	TAC	Al ³⁺	<i>E. coli</i>	<i>E. faec</i>	ASR	<i>P. aer</i>	
Temp	1																						
pH	0,14	1																					
Cond	0,26	0,32	1																				
Turb	-0,33	0,10	0,04	1																			
Coul	-0,27	0,22	0,03	0,85	1																		
NO ₂ ⁻	0,01	0,11	0,00	0,07	0,10	1																	
NO ₃ ⁻	-0,38	0,01	0,01	0,56	0,41	0,25	1																
NH ₄ ⁺	0,09	-0,15	0,23	-0,10	-0,12	0,06	-0,02	1															
Cl ⁻	0,20	-0,05	0,75	0,08	0,06	0,26	0,17	0,37	1														
MO	-0,37	0,21	0,02	0,46	0,51	0,07	0,55	-0,05	0,05	1													
Mn ²⁺	-0,43	0,05	-0,04	0,69	0,50	0,14	0,79	-0,09	0,09	0,47	1												
F ⁻	-0,10	0,23	0,13	0,02	0,06	0,50	0,40	-0,05	0,18	0,25	0,14	1											
Fe	-0,27	0,25	0,04	0,75	0,68	0,03	0,49	-0,07	0,01	0,38	0,61	-0,01	1										
Zn ²⁺	-0,12	0,13	-0,02	0,16	0,19	0,04	0,35	-0,03	-0,16	0,11	0,41	0,18	0,01	1									
Cu ²⁺	-0,10	0,17	0,09	0,53	0,54	0,09	0,66	-0,02	0,12	0,58	0,74	0,35	0,55	0,20	1								
DHT	0,19	0,47	0,71	-0,04	0,05	0,23	-0,05	0,04	0,41	0,10	-0,09	0,22	0,03	-0,02	-0,04	1							
TAC	0,14	0,33	0,48	0,00	0,06	0,02	-0,09	0,02	0,22	0,02	-0,04	0,02	0,09	0,00	-0,11	0,59	1						
Al ³⁺	-0,15	-0,27	0,10	0,57	0,32	-0,01	0,31	0,03	0,19	0,10	0,37	-0,09	0,25	0,06	0,06	-0,16	-0,05	1					
<i>E. coli</i>	-0,22	0,29	0,00	0,22	0,34	0,11	0,17	-0,14	-0,05	0,36	0,11	0,33	0,19	0,22	0,29	0,10	0,00	-0,06	1				
<i>E. faec</i>	-0,15	0,32	0,03	0,19	0,28	0,04	0,24	-0,10	0,01	0,53	0,15	0,46	0,17	0,09	0,28	0,07	0,09	-0,07	0,70	1			
ASR	-0,17	0,32	0,16	0,26	0,42	0,00	0,11	-0,03	0,03	0,28	0,17	0,31	0,21	0,33	0,07	0,26	0,22	0,00	0,26	0,44	1		
<i>P. aer</i>	-0,16	0,29	0,30	0,13	0,20	-0,01	0,11	-0,02	0,10	0,34	0,06	0,39	0,11	0,05	0,17	0,35	0,17	-0,08	0,48	0,55	0,33	1	

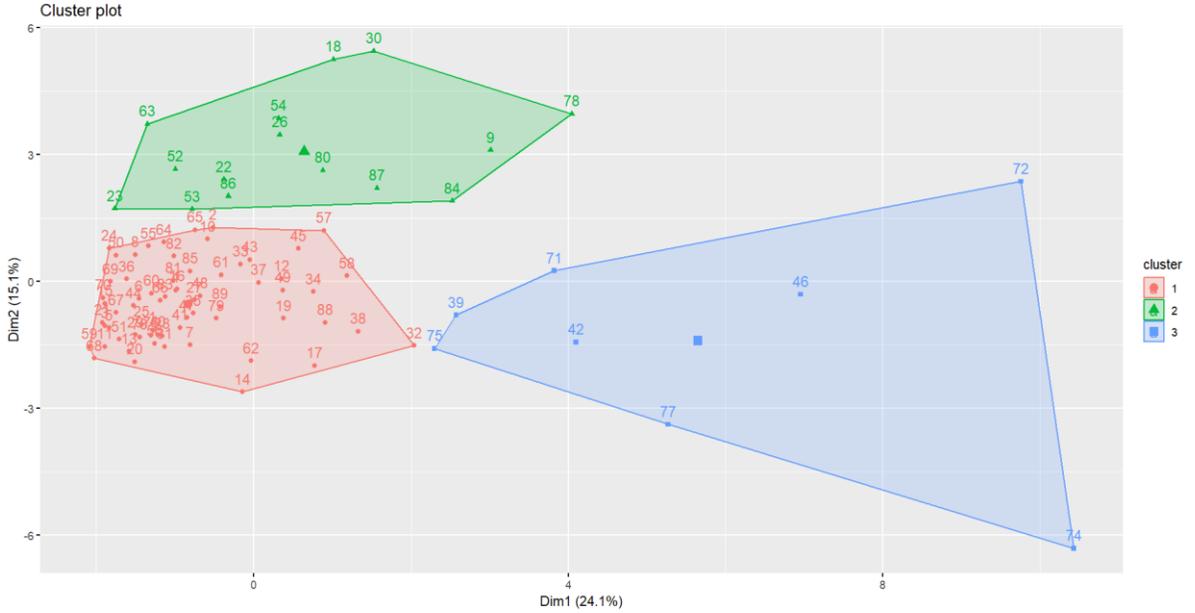


Figure 5 : Clusters de puits.

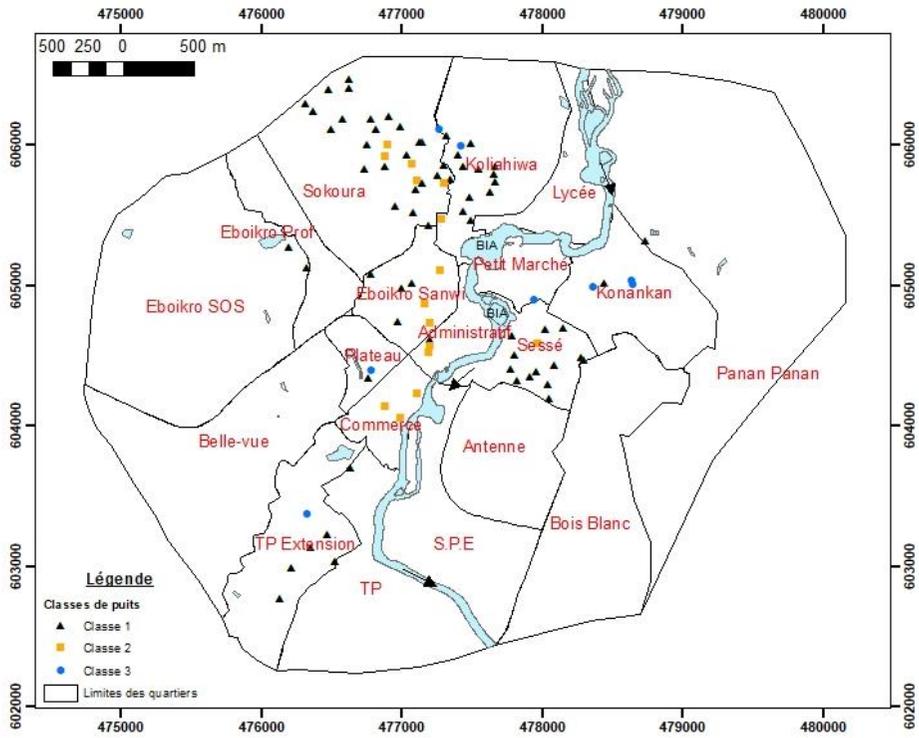


Figure 6 : Répartition des puits en fonction des classes (clusters).

DISCUSSION

Les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des échantillons d'eau de puits analysés peuvent résulter de facteurs naturels ou anthropiques (Brehme et al., 2011). Les eaux étudiées étaient douces (DHT = $66,30 \pm 49,53$ mg/l), acides (pH = $5,44 \pm 0,61$) et de minéralisation moyenne (Cond = $335,18 \pm 207,68$ μ S/cm). Ces caractères sont fonction de la géologie des terrains traversés (Belghiti et al., 2013; Orou et al., 2016) qui sont, dans le cas présent, des sols ferrallitiques fortement désaturés et des sols hydromorphes à gley (Ake et al., 2019). Cependant, selon Tapsoba (1995) cité par Ahoussi et al. (2012), le caractère acide des eaux souterraines en zone tropicale humide serait principalement imputable à la production de CO₂ dans les premières couches du sol. Par ailleurs, la conductivité était bien corrélée avec la dureté et les chlorures. Ce résultat est en accord avec celui de (Ahoulé et al., 2017).

Les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques des eaux à usage de boisson doivent également satisfaire à la fois à des exigences de sécurité sanitaire et d'acceptabilité (OMS, 2017). Les analyses effectuées ont montré que tous les échantillons d'eau étaient non conformes. La non-conformité était de 100% pour les paramètres physicochimiques et de 86,52% pour les paramètres microbiologiques.

Pour la physicochimie, les valeurs du fer total étaient supérieures à la norme pour 51,69% des échantillons, celles de la turbidité pour 67,42% et celles de la couleur pour 24,72% des échantillons. Les valeurs élevées de fer dans les eaux de puits pourraient être liées aux sols ferrallitiques fortement désaturés en présence. En effet, ces sols, composés essentiellement de quartz, de kaolinite, et d'oxyhydroxydes de fer (goethite et hématite) sont riches en fer (Brasset, 1995; Mfonka et al., 2015). D'ailleurs, les valeurs élevées de la turbidité et de la couleur pourraient être dues à

cette présence de fer mais aussi à du manganèse (Kabir et al., 2021), puisque ces deux éléments sont en général naturellement associés dans les roches (Kamenan, 2021). Cette relation entre le fer, le manganèse, la turbidité et la couleur est reflétée par les corrélations positives qui les lient. Toutefois, ces valeurs élevées de la turbidité et de la couleur pourraient aussi être liées soit à une intrusion de matière organique par infiltration d'eaux de surface ou de ruissellement, soit encore à la présence de matières en suspension (Orou et al., 2016; Gbamélé et al., 2020). La corrélation de la turbidité et de la couleur avec la matière organique et les NO₃⁻, indicateurs d'un apport d'eaux d'origine superficielle, suggère un pluvio-lessivage des sols ferrallitiques riches en fer et en manganèse par infiltration d'eaux de ruissellement de surface renfermant de la matière organique et des nitrates.

Pour la microbiologie, les fortes charges d'*E. coli* (2062 ± 4629 UFC/100 ml), indicateur de contamination fécale récente et d'*E. faecalis* (2027 ± 5493 UFC/100 ml) indicateur de contamination fécale ancienne, mesurées dans plus de 60% des puits pourraient provenir des latrines et fosses septiques. En effet, la distance minimale d'au moins 15 mètres recommandée entre puits et latrine / fosse septique et l'absence de toute source de pollution dans un rayon de 15 mètres autour du puits n'étaient pas respectées pour 68,54% des puits. Cependant, certains puits situés à plus de 15 mètres des latrines / fosses septiques et sans autres sources de pollution apparentes étaient fortement contaminés par ces bactéries. Ce résultat est en accord avec ceux de Dovonou et al. (2017) et Mondesir et al. (2018). La distance minimale de 15 mètres ne garantit donc pas une non-contamination des puits par les latrines comme mentionné par Dansou and Odoulami (2015). A contrario, d'autres études ont montré qu'une proximité des latrines n'était pas toujours associée à une moins bonne qualité de

l'eau (Kelly et al., 2020). Certains auteurs proposent une distance idéale variant de 30 à 50 mètres (Chauque et al., 2021). S'agissant de la différence non significative entre la contamination microbiologique mesurée dans les puits présentant des sources de pollution et ceux sans sources de pollution apparentes, elle pourrait être due à d'autres facteurs tels que l'ajout d'eau de javel dans les puits, leurs profondeurs et leurs aménagements (Djuikom et al., 2009; Gbagbo et al., 2022) et le type de sol (Wicaksono et Slamet, 2017).

Les différents puits ont été répartis en 3 clusters : cluster 1, cluster 2 et cluster 3. Le cluster 1 regroupait les puits caractérisés par de faibles valeurs des différents paramètres physicochimiques et microbiologiques contrairement aux clusters 2 et 3 qui avaient des teneurs élevées en certains paramètres. Le cluster 2 était caractérisé par des teneurs élevées en DHT, TAC, conductivité et pH. Ces teneurs élevées pourraient être dues à une pollution engendrée par des ordures ou des déchets (Tchoumou et al., 2017) d'une part, ou à un relargage de carbonates par le ciment utilisé pour la construction des puits (Gnazou et al., 2015) d'autre part. Quant au cluster 3, il était défini par des valeurs élevées de couleur, nitrates, turbidité, matière organique, Mn^{2+} , Fe, *E. coli* et *E. faecalis*, paramètres caractérisant une pollution d'origine naturelle et anthropique favorisée par le pluvio-lessivage des sols.

Conclusion

Des eaux de puits sont couramment utilisées dans certains quartiers de la ville d'Aboisso comme eau de boisson. Le contrôle qualité de 89 puits sélectionnés a objectivé 86,52% de non-conformité sur le plan microbiologique par la présence d'indicateurs de pollution fécale (*E. coli* et/ou *E. faecalis*) et 100% de non-conformité sur le plan physicochimique dominé par un pH acide. La classification ascendante hiérarchique a réparti les puits en trois groupes de pollutions

différentes : les moins pollués d'une part et les pollués à dominance calcaire et organique d'autre part. Pour l'amélioration de la qualité des eaux de puits, ces différentes pollutions doivent être prises en compte dans l'adaptation de la sensibilisation des chefs de ménage.

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'aucun conflit d'intérêts relatif à ce travail ne les lie à aucune personne physique ou morale.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

TOS a conçu le projet de recherche et les outils de collecte des données, participé à la collecte des données, à leur analyse et interprétation ainsi qu'à la rédaction du manuscrit. DFRM et WTY ont contribué à l'analyse statistique des données. NCA a et SAPK ont affiné le projet de recherche, participé à la rédaction du manuscrit et à la relecture du manuscrit final.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble du personnel technique du Laboratoire des Eaux et Aliments de l'Institut National d'Hygiène Publique pour leur contribution à la collecte des données et à la réalisation des analyses au laboratoire.

RÉFÉRENCES

- Abubakar IR. 2019. Factors influencing household access to drinking water in Nigeria. *Utilities Policy*, **58**: 40-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.03.005>
- Ahoulé DG, Ohou-Yao MJA, Yapo OB, Gnagne AEY, Mambo V. 2017. Caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la ville d'Abidjan: cas des communes d'Abobo, d'Attécoubé, de Koumassi et de Yopougon. *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.*, **44**: 51-57.

- Ahoussi KE, Koffi YB, Kouassi AM, Soro G, Soro N, Biemi J. 2012. Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**(4): 1854-1873. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.40>
- Ake GE, Eba AEL, Assi JJ, Kouadio BH, Biemi J. 2019. Apport des SIG à la délimitation des périmètres de protection autour de la prise d'eau de la SODECI à Aboisso, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Afrique SCIENCE*, **15**: 234-252.
- Amin NC, Dibi SK, Yapo TW, Able NC, Kpaibé SAP, Kouadio L, Malan A. 2019. Chemical and Bacteriological Control of Drinking Water from 15 Villages in Côte d'Ivoire. *International Journal of Nutrition and Food Sciences*, **7**(6): 180-186. DOI: <http://dx.doi.org/10.11648/j.ijnfs.20180706.11>
- Anctil F. 2016. *L'Eau et ses Enjeux* (2e édition). Presses de l'Université Laval.
- Assouman A, Kpan OJG, Gnamba FM, Oga YMS, Biemi J. 2020. Impacts of Agrochemicals on Water Quality Parameters in Aboisso Region (South-East of Cote d'Ivoire). *Current Journal of Applied Science and Technology*, **39**(46): 1-19. DOI: <http://dx.doi.org/10.9734/cjast/2020/v39i4631167>
- Belghiti ML, Chahlaoui A, Bengoumi D, El Moustaine R. 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quadernaire dans la région de Meknès (Maroc). *LARHYSS Journal*, **14**: 21-36.
- Bourque J, Poulin N, Cleaver AF. 2007. Évaluation de l'utilisation et de la présentation des résultats d'analyses factorielles et d'analyses en composantes principales en éducation. *Revue Des Sciences de l'Education*, **32**: 325-344. DOI: <http://dx.doi.org/10.7202/014411ar>
- Brasset T. 1995. Etude par spectroscopie en réflectance diffuse (visible et proche infrarouge) de la transformation de l'héritage ferrallitique en Basse-Casamance (Sénégal): exemple de la toposéquence de Yabone. Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot - Paris 7, p. 220.
- Brehme M, Scheytt T, Çelik M, Dokuz U. 2011. Hydrochemical characterisation of ground and surface water at Dörtyol/Hatay/Turkey. *Environmental Earth Sciences*, **63**: 1395-1408. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0810-1>
- Chauque BJM, Chicumbe CM, Cossa VC, Rott MB. 2021. Spatial arrangement of well and latrine and their influence on water quality in clayey soil – a study in low-income peri-urban neighborhoods in Lichinga, Mozambique. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, **11**: 241-254. DOI: <https://doi.org/doi:10.2166/washdev.2021.137>
- Dansou BS, Odoulami L. 2015. Facteurs de dégradation des eaux de puits à usage domestique dans la Commune de Pobè au Sud-Est du Bénin. *Afrique SCIENCE*, **11**(6): 367-376.
- Djuikom E, Temgoua E, Jugnia L, Nola M, Baane M. 2009. Pollution bactériologique des puits d'eau utilisés par les populations dans la Communauté Urbaine de Douala - Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **3**(5): 967-978. DOI: <https://doi.org/doi:10.4314/ijbcs.v3i5.51076>
- Dovonou FE, Alassane A, Adjahossou VN, Agbodo B, Djibril R, Mama D. 2017. Impacts de l'assainissement autonome sur

- la qualité des eaux de puits dans la Commune de Sèmè-Podji (Sud-Bénin). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **11**(6): 3086-3099. DOI: <https://doi.org/doi:10.4314/ijbcs.v11i6.42>
- Gbagbo TA, Kpaibe SAP, Meless DFR, Seki TO, Bakayoko A, Agbessi TK, Amin NC. 2022. Spatio-Temporal Evolution of the Quality of Drinking Water in M'pody, a Village in the District of Anyama (Ivory Coast). *International Journal of Environmental Chemistry*, **6**: 42-50. DOI: <https://doi.org/doi:10.11648/j.ijec.20220602.12>
- Gbamélé KS, Konan KS, Kouassi KL, Brou Alexis, Konan KF, Bini KD. 2020. Evaluation de la Contamination Chimique des Eaux Souterraines par les Activités Anthropiques: Cas de la Zone d'Ity-Floleu Sous-Préfecture de Zouan-Hounien, Ouest de la Côte d'Ivoire. *European Scientific Journal*, **16**(6): 247-274. DOI: <https://doi.org/doi:10.19044/esj.2020.v16n6p247>
- Gnazou MDT, Assogba K, Sabi BE, Bawa LM. 2015. Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux utilisées dans les écoles de la préfecture de Zio (Togo). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(1): 504-516. DOI: <https://doi.org/doi:10.4314/ijbcs.v9i1.43>
- Institut National de la Statistique (INS). 2017. Enquête par grappes à indicateurs multiples, 2016, Rapport des Résultats clés. Ministère du Plan et du Développement, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Kabir A, Ahmed A, Rahman M, Md Taimur I, Ahmad S, Khan MM, Saifur Rahman M, Noor A. 2021. Root cause of groundwater colouration in coastal districts of Bangladesh: findings from a preliminary study. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, **33**: 425-436. DOI: <https://doi.org/10.1080/26395940.2021.2003723>
- Kamenan YM. 2021. Elaboration d'un Modèle De Protection Des Eaux Souterraines En Zone De Socle: Cas Des Aquifères Du Bassin Versant De La Lobo à Nibéhibé (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire) (PhD Thesis). Université Jean Lorougnon Guédé Daloa, Côte d'Ivoire, p.171.
- Kelly ER, Cronk R, Kumpel E, Howard G, Bartram J. 2020. How we assess water safety: A critical review of sanitary inspection and water quality analysis. *Science of The Total Environment*, **718**: 137237. DOI: <https://doi.org/doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137237>
- Klotz F. 2010. L'eau, la vie et la mort. *Journal Africain d'Hépatogastroentérologie*, **4**: 77-77. DOI: <https://doi.org/doi:10.1007/s12157-010-0169-7>
- Mondesir TK, Niamke GM, Amin NC, Anoh KP. 2018. Impact des facteurs physiographiques sur la pollution bactérienne des eaux de puits dans la ville de Gagnoa (Cote d'Ivoire). *Revue Bio-Africa*, **19**: 34-45.
- MSHPCMU. 2021. Rapport Annuel sur la Situation Sanitaire (RASS) 2020. DIIS (Direction de l'Informatique et de l'Information Sanitaire.
- Mfonka Z, Ndam Ngoupayou JR, Ndjigui PD, Zammouri M, Kpoumie A, Rasolomanana E. 2015. Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **9**(4): 2200-2218. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.39>
- Niamké GM. 2016. Dégradation de l'environnement et santé de la population dans la ville d'Aboisso. Thèse Unique de

- Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire. p. 273.
- Okonkwo A. 2015. A Re-Appraisal of Groundwater Quality in Parts of Central Benue Trough, Nigeria. *International Journal of Advanced Materials Research*, **1**: 102-112.
- OMS. 2017. *Directives de Qualité pour l'Eau de Boisson* (4e éd. + 1er additif). Organisation Mondiale de la Santé : Genève.
- ONU. 2021. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021: La valeur de l'eau. UNESCO, Paris.
- Orou RK, Coulibaly KJ, Tanoh GA, Ahoussi EK, Kissiedou PEK, Soro DT. 2016. Qualité et vulnérabilité des eaux d'aquifère d'altérites dans les sous-préfectures de Grand-Morié et d'Azaguié dans le département d'Agboville au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, **28**: 243-272.
- Rodier J, Legube B, Merlet N. 2009. *L'Analyse de l'Eau* (9e éd. entièrement mise à jour). Dunod: Paris.
- Sognon LM, Gbadamassi F, Montcho JC, Gbadamassi M, Boni S, Yalo N. 2022. Spatialization of chemical characteristics of underground water - well water - in the township of Parakou. *International Journal Water Sciences and Environment Technologies*, **7**(2): 36-48.
- Tchoumou M, Kami-Ouako M, Mbilou UG, Ossebi JG. 2017. Comparative study of physicochemical parameters of water of four waterways in the town of Brazzaville, republic of Congo. *LARHYSS Journal*, **29**: 61-74.
- Wicaksono D, Slamet A. 2017. The strategy of domestic wastewater management in Kenjeran Surabaya. *Sustinere: Journal of Environment and Sustainability*, **1**: 99-108. DOI: <https://doi.org/doi:10.22515/sustinere.jes.v1i2.20>.