

Évaluation comparative de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages de Makiso, (Kisangani, RDC), en saisons pluvieuse et sèche

Moussa Issoufou Djibo

Mastérrant, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi, (IFA-Yangambi), Département de Chimie Analytique Appliquée à la Technologie de déchets, Kisangani, RD Congo

Zoé-Arthur Kazadi Malumba

Professeur Ordinaire, Université de Kisangani (UNIKIS), Département des Sciences Biotechnologiques, RD Congo

Joseph Saile Isaka

Professeur, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi), Kisangani, RD Congo

Pascaline Likango Lutha

Docteur en Thèse, Département de Chimie et Industries agricoles, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi), Kisangani, RD Congo

Jacqueline Makatiani

Docteur en Thèse, Département des Sciences Biologiques, Moi Université, Eldoret, Kenya

Benjamin Dowiya Nzawe

Professeur Ordinaire, Laboratoire de Génétique et Amélioration des Plantes (LGAP), Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi, (IFA-Yangambi), Kisangani, RD Congo

[Doi:10.19044/esj.2026.v22n15p194](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n15p194)

Submitted: 23 April 2026

Accepted: 26 May 2026

Published: 31 May 2026

Copyright 2026 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Issoufou Djibo, M., Kazadi Malumba, Z.-A., Saile Isaka, J., Likango Lutha, P., Makatiani, J., & Dowiya Nzawe, B. (2026). *Évaluation comparative de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages de Makiso, (Kisangani, RDC), en saisons pluvieuse et sèche*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (15), 194.

<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n15p194>

Résumé

Le présent travail porte sur l'évaluation comparative de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages utilisées pour la consommation humaine dans la commune de Makiso à Kisangani (RDC), en tenant compte des variations saisonnières entre la saison pluvieuse et la saison sèche. L'étude a concerné dix (10) points d'eau, dont cinq (5) puits et cinq (5) forages, répartis dans différents quartiers de la commune. Au total, soixante (60) échantillons d'eau ont été analysés au cours de six (6) campagnes d'échantillonnage, dont trois réalisées en saison pluvieuse et trois en saison sèche. Les paramètres physico-chimiques ont été déterminés suivant les méthodes standards recommandées, tandis que les analyses microbiologiques ont été réalisées par la méthode d'ensemencement en profondeur ainsi que par la méthode du Nombre le Plus Probable (NPP). Les résultats physico-chimiques montrent une température relativement stable comprise entre 26,2 et 28,0 °C, une conductivité électrique modérée (68,7 - 381,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ainsi que des concentrations en nitrates, nitrites et chlorures conformes aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). En revanche, les eaux étudiées présentent un caractère acide avec des valeurs de pH variant de 4,9 à 6,8. Des différences significatives entre les saisons ont été observées pour la température ($p = 0,013$), le pH ($p = 0,005$) et la dureté totale ($p < 0,001$). La turbidité est restée élevée dans plusieurs puits, atteignant 41,7 NTU, tandis que les concentrations en fer total dépassaient localement la limite recommandée par l'OMS. Les résultats microbiologiques révèlent une contamination importante des eaux, caractérisée par des concentrations élevées de germes totaux (2 267 - 21 633 UFC/100 ml), de coliformes totaux (67 - 7 533 UFC/100 ml), de coliformes fécaux et de streptocoques fécaux. La présence d'*Escherichia coli* et de bactéries du groupe *Salmonella spp.* a également été observée dans certains échantillons. Une différence statistiquement significative a été observée pour les streptocoques fécaux entre les deux saisons ($p = 0,005$). Les analyses statistiques multivariées (ACP, corrélation de Pearson et classification hiérarchique ascendante) ont mis en évidence une différenciation nette entre les eaux de puits et de forages, les puits apparaissant globalement plus vulnérables à la contamination. Ces résultats montrent que la majorité des eaux étudiées ne respectent pas les normes de potabilité recommandées pour la consommation humaine et soulignent la nécessité de renforcer les mesures de protection sanitaire des ouvrages hydrauliques dans la commune de Makiso.

Mots-clés: Qualité de l'eau ; Eaux souterraines ; Puits ; Forages ; Contamination microbiologique ; Paramètres physico-chimiques ; Variabilité saisonnière ; Kisangani ; RDC ; OMS

Comparative Assessment of the Physico-Chemical and Microbiological Quality of Well and Borehole Water in Makiso (Kisangani, DRC) During the Rainy and Dry Seasons

Moussa Issoufou Djibo

Master, Faculty Institute of Agronomic Sciences of Yangambi (IFA-Yangambi), Department of Analytical Chemistry Applied to Waste Technology, Kisangani, DR Congo

Zoé-Arthur Kazadi Malumba

Ordinary Professor, University of Kisangani (UNIKIS),
Department of Biotechnological Sciences, DR Congo

Joseph Saile Isaka

Professeur, Institut Facultaire des Sciences Agronomiques de Yangambi (IFA-Yangambi), Kisangani, RD Congo

Pascaline Likango Lutha

Doctor in Thesis, Department of Chemistry and Agricultural Industries, Faculty Institute of Agronomic Sciences of Yangambi (IFA-Yangambi), Kisangani, DR Congo

Jacqueline Makatiani

Doctor in Thesis, Department of Biological Sciences,
Moi University, Eldoret, Kenya

Benjamin Dowiya Nzawe

Ordinary Professor, Laboratory of Genetics and Plant Improvement (LGAP), Faculty Institute of Agronomic Sciences of Yangambi (IFA-Yangambi), Kisangani, DR Congo

Abstract

This study focused on the comparative assessment of the physico-chemical and microbiological quality of well and borehole water used for human consumption in Makiso Municipality, Kisangani (DRC), taking into account seasonal variations between the rainy and dry seasons. The study involved ten (10) water points, including five (5) wells and five (5) boreholes distributed across different neighborhoods of the municipality. A total of sixty (60) water samples were analyzed during six (6) sampling campaigns, including three conducted during the rainy season and three during the dry season. Physico-chemical parameters were determined using standard recommended methods, while microbiological analyses were performed using the pour plate method and the Most Probable Number (MPN) method. The physico-chemical results showed relatively stable temperatures ranging from 26.2 to 28.0 °C, moderate electrical conductivity (68.7–381.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$), and

nitrate, nitrite, and chloride concentrations compliant with the recommendations of the World Health Organization (WHO). However, the studied waters exhibited acidic characteristics with pH values ranging from 4.9 to 6.8. Significant seasonal differences were observed for temperature ($p = 0.013$), pH ($p = 0.005$), and total hardness ($p < 0.001$). Turbidity remained high in several wells, reaching 41.7 NTU, while total iron concentrations locally exceeded the WHO-recommended limit. Microbiological results revealed significant contamination of the water sources, characterized by high concentrations of total germs (2,267–21,633 CFU/100 mL), total coliforms (67–7,533 CFU/100 mL), fecal coliforms, and fecal streptococci. The presence of *Escherichia coli* and bacteria belonging to the *Salmonella spp.* group was also observed in some samples. A statistically significant difference was observed for fecal streptococci between the two seasons ($p = 0.005$). Multivariate statistical analyses (PCA, Pearson correlation, and hierarchical clustering) revealed a clear differentiation between well and borehole waters, with wells appearing globally more vulnerable to contamination. These findings indicate that most of the studied water sources do not comply with drinking water standards recommended for human consumption and highlight the need to strengthen sanitary protection measures around water supply facilities in Makiso Municipality.

Keywords: Water quality; Groundwater; Wells; Boreholes; Microbiological contamination; Physico-chemical parameters; Seasonal variability; Kisangani; DRC; WHO

Introduction

L'eau est indispensable à toute forme de vie et joue également un rôle clé dans l'amélioration de la santé humaine ainsi que dans le développement socio-économique (Ahoussi *et al.*, 2018 ; Maoudombaye *et al.*, 2015). Elle doit avoir une très bonne qualité physico-chimique, chimique et microbiologique pour être utilisée pour la consommation, l'hygiène ou les loisirs. En effet, les substances qu'elle peut contenir sont susceptibles d'être absorbées par ingestion, par inhalation ou par contact avec la peau (Degbey *et al.*, 2009).

La République Démocratique du Congo (RDC) a des difficultés à fournir de l'eau potable à sa population alors qu'elle dispose d'importantes ressources hydriques, capables d'approvisionner toute l'Afrique (Kyowire *et al.* 2016).

Actuellement, de nombreuses villes et régions connaissent de grandes difficultés à accéder à l'eau potable. Selon les données du Ministère de l'Énergie et du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), le taux national de couverture qui était de 69 % en 1990 est passé à 22 % en

2005, pour s'établir à 26 % en 2010 (PNUE, 2011). Ce niveau reste largement au-dessous de la moyenne estimée à 60 % pour l'ensemble de l'Afrique subsaharienne.

À Kisangani, ville entourée de nombreux cours d'eau, ces eaux disponibles présentent généralement des caractéristiques organoleptiques acceptables (en termes de couleur, de goût et d'odeur). Cependant, dans de nombreuses communes, l'accès à l'eau potable reste limité, du fait du peu de points d'approvisionnement en eau courante. Dans les communes de Lubunga, Kisangani, Kabondo et Mangobo, il n'est pas rare de rencontrer moins de huit robinets par avenue, ce qui contribue à l'insuffisance d'accès à l'eau potable. Cette situation oblige une grande partie de la population à utiliser des sources d'eau non aménagées, dont la plupart ne répondent pas aux normes de potabilité (Nathan et *al.*, 2023).

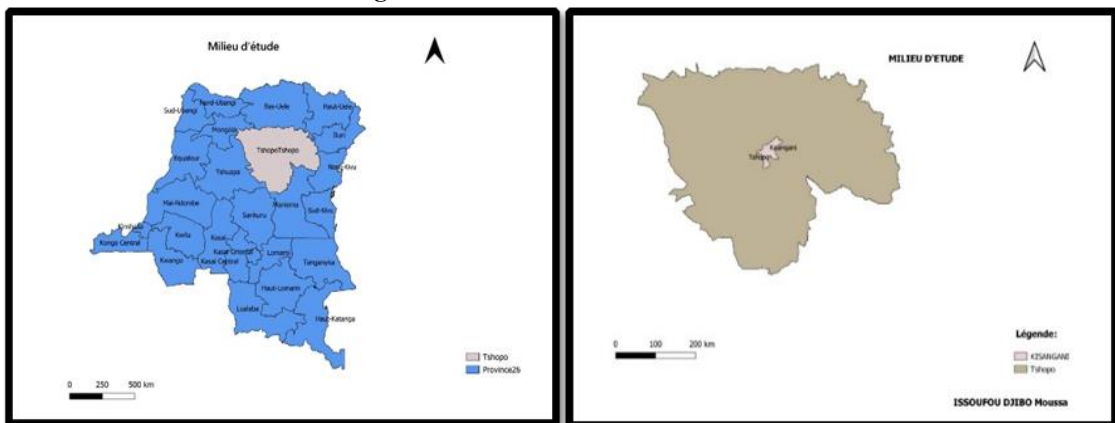
Le but de cette étude est d'évaluer et comparer la qualité de ces eaux en fonction de type de source (puits et forages) et des variations saisonnières (saison pluvieuse et saison sèche), afin de déterminer leur potabilité et les risques sanitaires associés.

Matériel et méthodes

Présentation du site d'étude

Kisangani, chef-lieu de la province de Tshopo, est située au Nord-Est de la République Démocratique du Congo. Elle s'étend sur une superficie de 1910 Km² et elle compte 853 616 habitants (UN-Habitat, 2026). Les activités économiques principales exercées par la population sont le commerce, puis l'agriculture et l'artisanat (World Bank, 2019). D'un point de vue administratif, elle compte six (6) communes urbaines : Makiso, Kisangani, Tshopo, Mangobo, Kabondo et Lubunga (ACF, 2009).

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude





Méthodes d'enquêtes

La collecte des données a été réalisée auprès des résidents utilisant l'eau de puits et/ou de forages comme source d'approvisionnement. Une enquête par questionnaire, complétée par des observations directes sur le terrain, a permis d'identifier et caractériser précisément chacun des sites de prélèvement.

Echantillonnage et analyses chimiques et microbiologiques

Les échantillons d'eau ont été collectés dans des flacons stériles de 300 ml destinés aux analyses microbiologiques et dans des bouteilles en polyéthylène de 750 ml pour les analyses physico-chimiques. Les prélèvements ont été effectués tôt le matin, entre 7 h et 14 h (GMT+2). Les échantillons ont ensuite été conservés dans une glacière contenant des glaçons à une température d'environ 4 °C jusqu'à leur acheminement au laboratoire de la REGIDESO et au laboratoire de microbiologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Kisangani (UNIKIS) pour analyses, conformément aux recommandations de Rodier et al. (2009).

L'étude a porté sur dix (10) points d'eau répartis dans différents quartiers de la commune Makiso, dont cinq (5) puits et cinq (5) forages sélectionnés en fonction de leur accessibilité, de la densité de la population environnante et de leur fréquence d'utilisation par les habitants. Au total, six campagnes d'échantillonnage ont été réalisées, dont trois durant la saison pluvieuse (novembre 2025) et trois durant la saison sèche (février 2026), à raison d'une campagne tous les cinq jours. Chaque point d'eau a été échantillonné une fois par campagne, soit un total de soixante (60) échantillons analysés au cours de cette étude (Figures 2, 3 et 4).



Figure 2: Prélèvement dans un forage manuel **Figure 3:** Prélèvement dans un Puits d'eau



Figure 4 : Analyses in situ des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés in situ comprenaient la température, le potentiel hydrogène (pH) et la conductivité électrique. Ces mesures ont été réalisées directement sur le terrain à l'aide d'un multiparamètre HACH DR1900 et SL1000. Afin d'améliorer la fiabilité des données, trois mesures successives ont été effectuées pour chaque paramètre au niveau de chaque point d'eau, et les valeurs moyennes obtenues ont été retenues pour les analyses statistiques.

Au laboratoire, plusieurs paramètres chimiques ont été déterminés, notamment les ions chlorures et la dureté totale par dosage, ainsi que les nitrates, nitrites et le fer total par méthode spectrophotométrique. La turbidité a été déterminée par néphélométrie.

Concernant les analyses microbiologiques, la méthode d'ensemencement en profondeur a été utilisée pour la détermination des coliformes totaux, *Escherichia coli*, *Salmonella spp.* (après pré-enrichissement dans le bouillon de Hauffman) ainsi que des germes totaux, conformément à la norme ISO 8199 (1988), durant les deux saisons d'étude.

En revanche, pour le dénombrement des coliformes fécaux et des streptocoques fécaux durant la saison sèche, la méthode des dilutions successives en milieu liquide (technique NPP à trois tubes par série) a été

utilisée afin d'améliorer la sensibilité et la précision des analyses microbiologiques. Cette méthode est décrite par University of Batna 2 (2026). Les milieux de culture utilisés variaient légèrement selon les campagnes d'analyses et la disponibilité des réactifs au laboratoire, tout en respectant les protocoles standards d'analyse microbiologique des eaux présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Milieux de culture et conditions d'incubation utilisés pour les analyses microbiologiques

Paramètre microbiologique	Milieu de culture	Température	Durée
Germes totaux (GT)	Gélose nutritive (GN)	37 °C	24 h
Coliformes totaux (CT)	EMB Levine Agar	37 °C	24 h
<i>Escherichia coli</i> (E. coli)	EMB Levine Agar	44 °C	24 h
Coliformes fécaux (CF) – saison pluvieuse	EMB Levine Agar	44 °C	24 h
Coliformes fécaux (CF) – saison sèche	Bouillon lactosé	44 °C	24 h
Salmonella spp.	Bouillon Kauffmann (BK) + XLD Agar	37 °C	24 h
Streptocoques fécaux (SF) – saison pluvieuse	Slanetz & Bartley Agar	37 °C	48 h
Streptocoques fécaux (SF) – saison sèche	Lait de Sherman	37 °C	24 h

Les coordonnées géographiques des différents points d'eau (Puits et Forages) échantillonnés dans la commune Makiso sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Coordonnées des points d'eaux (Puits et Forages) échantillonnées dans la commune Makiso, Kisangani

N°	Nom du point	Commune	Coordonnées Géographiques (en décimale)	
			Latitude Nord	Longitude Est
01	CUKIS	Makiso	0,51215	25,1672
02	Faculté des sciences	Makiso	0,5120245	25,2079555
03	Lycée Anuarite	Makiso	0,5222383	25,1395096
04	Météo	Makiso	0,515382	25,1543598
05	Motumbé	Makiso	0,549416667	25,20525
06	3 ^{ème} Cabine	Makiso	0,5197869	25,1687835
07	Av. Bolembe	Makiso	0,525216667	25,15098333
08	Av. Bumba	Makiso	0,524533333	25,15322833
09	Av. Lokinda	Makiso	0,517516667	25,16858333
10	Av. Kiwele	Makiso	0,523533333	25,15801667

Les données collectées ont été soumises à différentes analyses statistiques, notamment la statistique descriptive, l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la corrélation de Pearson ainsi que la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) basée sur la distance euclidienne moyenne, à l'aide des logiciels R version 4.3.3 et Microsoft Excel 2016. Avant l'application des tests statistiques, les conditions de normalité des données et d'homogénéité des variances ont été vérifiées. Les comparaisons statistiques ont été réalisées au seuil de significativité de 5 % ($p < 0,05$). Par ailleurs, des mesures de contrôle qualité ont été appliquées au laboratoire, notamment la stérilisation du matériel, l'utilisation de milieux de culture conformes ainsi que

le respect des conditions d'incubation recommandées. L'Analyse en Composantes Principales (ACP), largement utilisée dans l'interprétation des données hydrochimiques (Bennasser, 1997), a été appliquée afin de mieux comprendre les relations entre les paramètres physico-chimiques et d'identifier les similitudes entre les eaux de puits et de forages. La corrélation de Pearson a permis d'évaluer les relations linéaires entre les différents paramètres physico-chimiques étudiés, tandis que la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a été utilisée pour regrouper les points d'eau présentant des caractéristiques similaires. Pour ces analyses, neuf (9) variables physico-chimiques ont été considérées, à savoir : la température, le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), la turbidité, les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), le fer total (Fe), la dureté totale (TH) et les ions chlorures (Cl^-).

Résultats

Résultats des analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques des eaux de puits et de forages réalisées dans la commune de Makiso ont montré une variabilité spatiale et saisonnière des paramètres étudiés (Tableau 3).

Tableau 3: Comparaison des paramètres physico-chimiques des eaux de Puits et de Forages de Makiso (Kisangani, RDC) entre les saisons pluvieuse et sèche

Paramètre	Unité	Saison pluvieuse (Moy ± ET)	Saison sèche (Moy ± ET)	p-value	Normes OMS	Conformité
Température	°C	26,66 ± 0,37	27,17 ± 0,99	0,013	< 25 °C (indicatif)	Valeurs élevées
pH	-	5,32 ± 0,5	5,81 ± 0,78	0,005	6,5 – 8,5	Inférieur aux valeurs des normes
Conductivité (CE)	µS/cm	160,6 ± 86,92	181,75 ± 103,35	0,394	≤ 1000	Conforme
Turbidité (TB)	NTU	9,87 ± 19,06	8,51 ± 14,67	0,758	≤ 5	Supérieur aux valeurs des normes
Dureté totale (TH)	mg/l	26,73 ± 23,25	7,22 ± 5,96	9,28E-05	≤ 100*	Conforme
Nitrates (NO_3^-)	mg/l	5,04 ± 4,33	4,96 ± 4,32	0,943	≤ 50	Conforme
Nitrites (NO_2^-)	mg/l	0,06 ± 0,13	0,095 ± 0,13	0,309	≤ 3	Conforme
Fer total (Fe)	mg/l	0,375 ± 0,50	0,17 ± 0,35	0,073	≤ 0,2	Valeurs supérieures aux normes en saison pluvieuse
Chlorures (Cl^-)	mg/l	25,96 ± 24,36	32,82 ± 26,28	0,298	≤ 250	Conforme

Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type (ET). Les p-values correspondent au test t de Student comparant les paramètres physico-chimiques entre les saisons pluvieuse et sèche. Les différences sont considérées statistiquement significatives pour $p < 0,05$. La valeur de température indiquée par l'OMS est donnée à titre indicatif.

Température

Les résultats de la Figure 5 indiquent que les températures des eaux de puits et de forages varient globalement entre 26,2°C et 28,0°C, avec une légère augmentation en saison sèche.

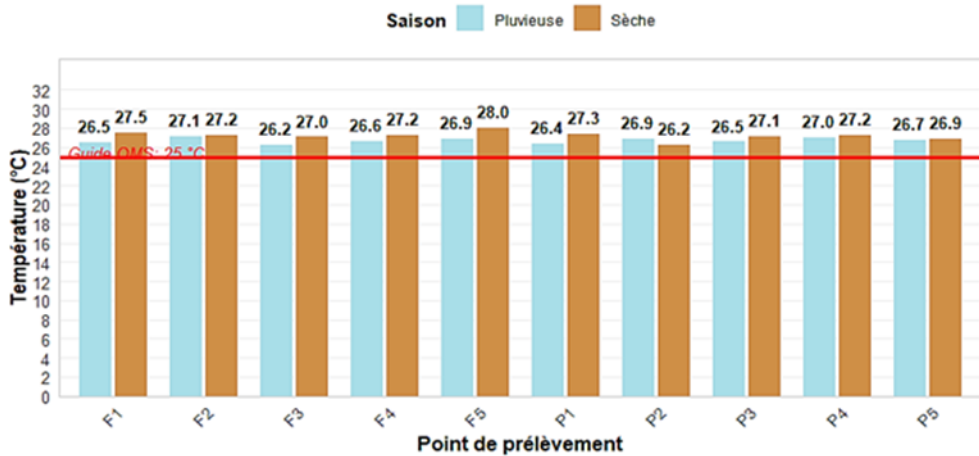


Figure 5: Variation saisonnière de la température des eaux de puits (P) et de forages (F) dans la commune de Makiso

Potentiel d'hydrogène (pH)

Les valeurs de pH sont comprises entre 4,9 et 6,8 (Figure 6). La majorité des échantillons présente un caractère acide, particulièrement dans les puits. Les forages affichent des valeurs légèrement plus élevées mais restent souvent inférieures à la norme recommandée pour l'eau potable.

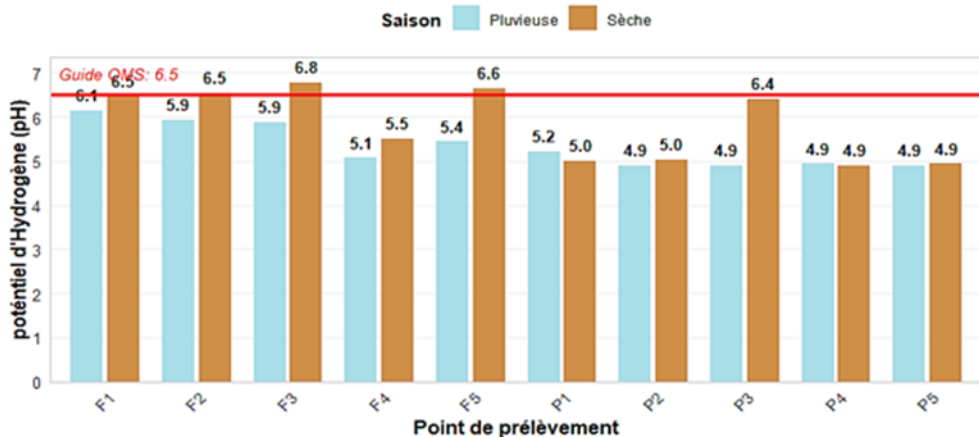


Figure 6 : Variation du pH des eaux de puits (P) et de forages (F) comparée aux normes de l'OMS

Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) varie de 68,7 à 381,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui témoigne d'une minéralisation modérée des eaux. On a noté les valeurs les plus élevées dans certains puits, notamment durant la saison sèche (Figure 7).

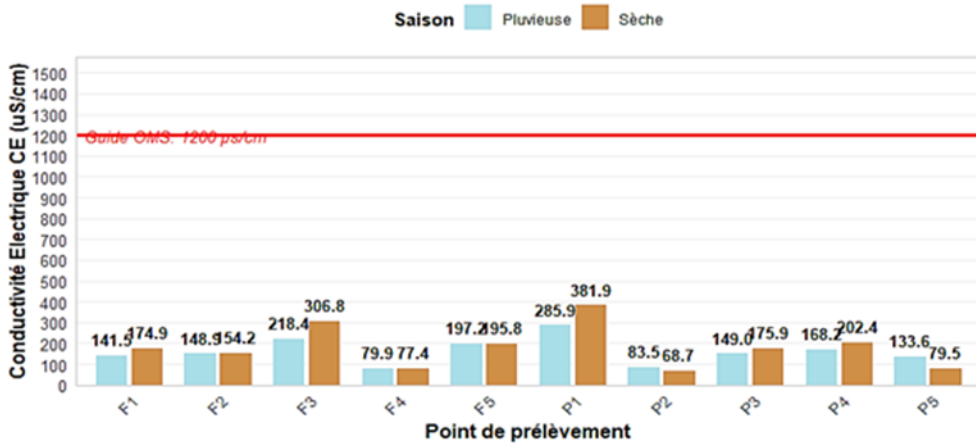


Figure 7 : Distribution de la conductivité électrique (CE) des eaux de puits (P) et de forages (F) selon les saisons

Turbidité (TB)

Dans les forages, la **turbidité** est généralement faible (1–3 NTU), tandis que dans certains puits elle atteint des valeurs très élevées, supérieures à 40 NTU (Figure 8).

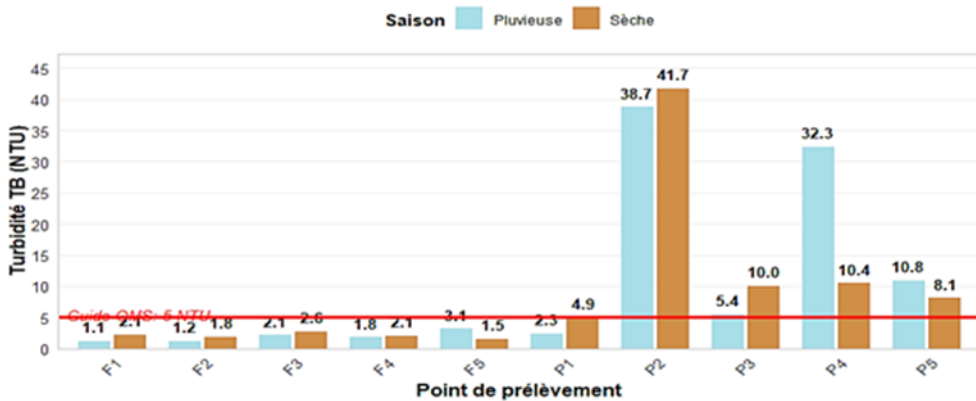


Figure 8 : Variation de la turbidité (TB) des eaux de puits (P) et de forages (F) et comparaison avec la valeur guide de l'OMS

Dureté totale (TH)

La dureté totale (TH) varie de 1,7 à 64,7 mg/L, ce qui indique que les eaux étudiées sont globalement douces (Figure 9).

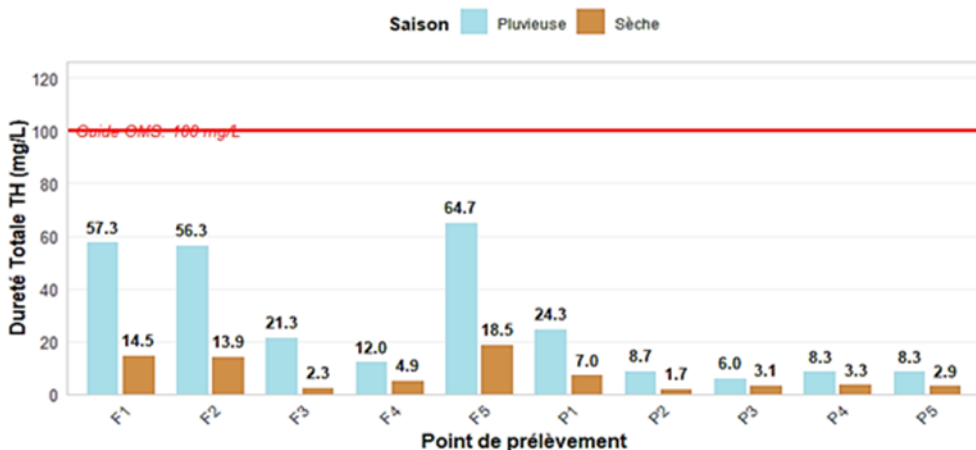


Figure 9 : Répartition de la dureté totale (TH) des eaux de puits (P) et de forages (F)

Nitrates (NO_3^-) et Nitrites (NO_2^-)

Les concentrations de **nitrates** (NO_3^-) et de **nitrites** (NO_2^-) demeurent basses et inférieures aux seuils recommandés pour l'eau potable (Figures 10 et 11).

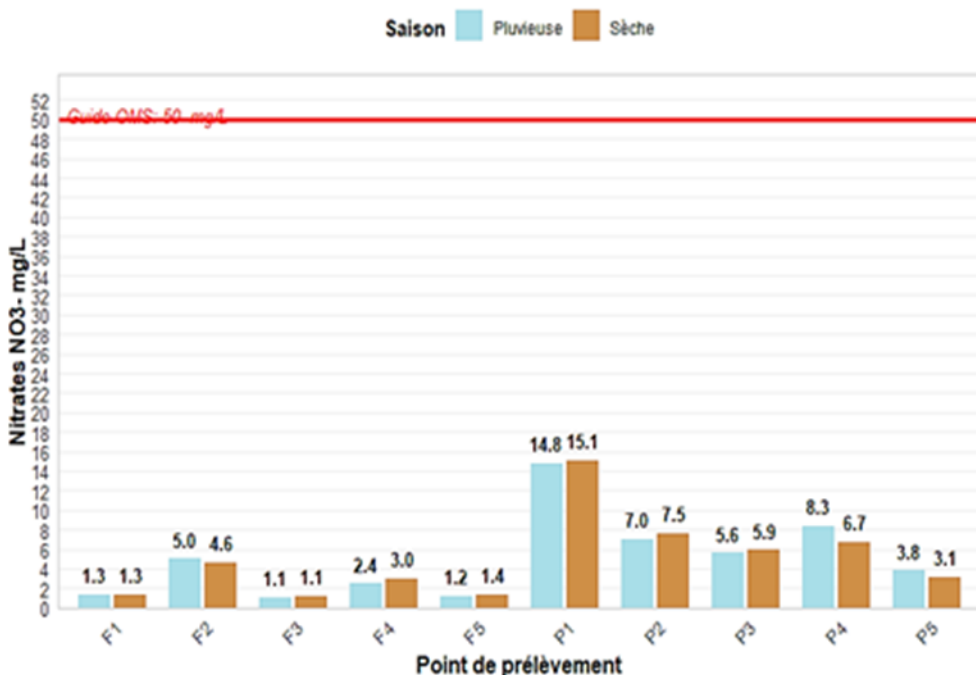


Figure 10 : Concentrations en nitrates (NO_3^-) dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

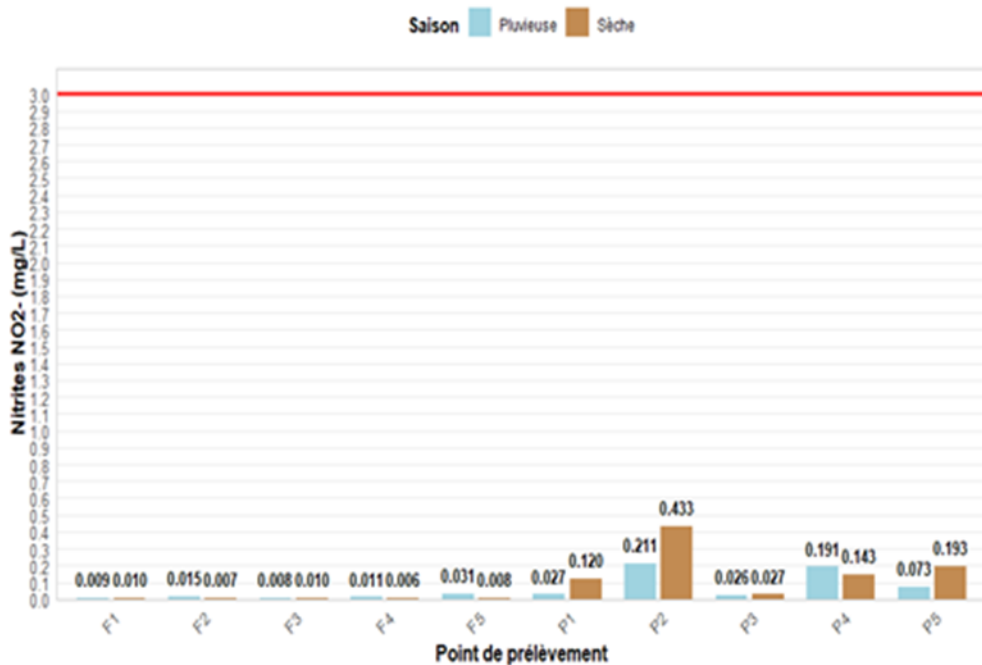


Figure 11 : Concentrations en nitrites (NO_2^-) dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Fer total (Fe)

Les teneurs en fer varient entre 0,02 et 1,49 mg/L. Des dépassements de la valeur guide (0,2 mg/L) sont observés dans plusieurs puits, notamment au point P2 (Figure 12).

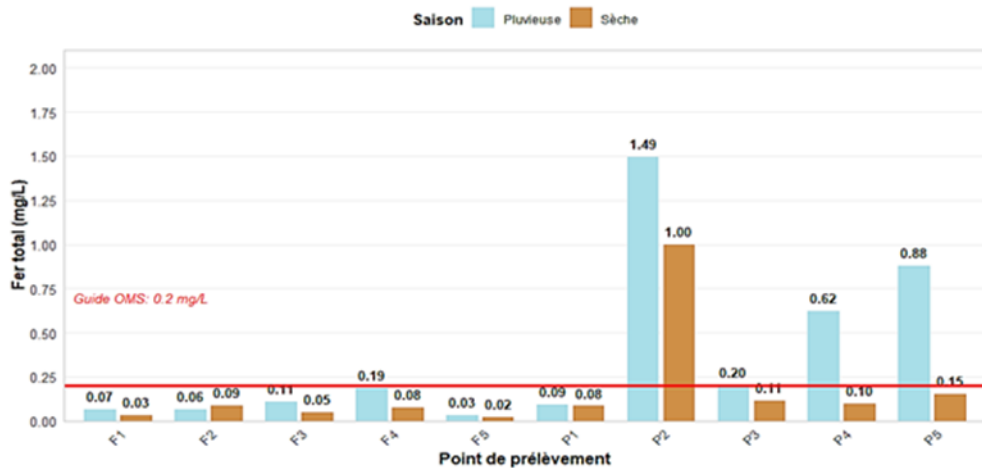


Figure 12 : Distribution du fer total (Fe) dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Chlorures (Cl^-)

Les teneurs en **chlorures** (Cl^-), qui varient entre 0,5 et 94,7 mg/L, restent inférieures au seuil de 250 mg/L défini par les normes internationales (Figure 13).

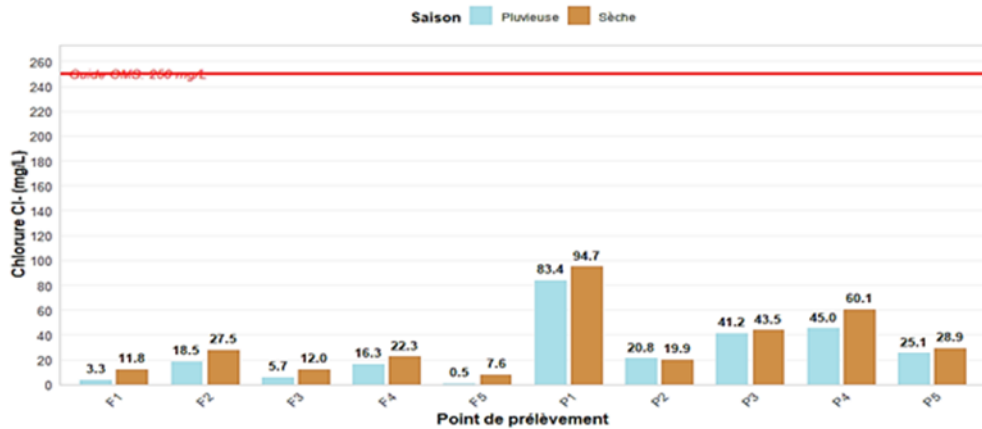


Figure 13 : Concentrations en chlorures (Cl^-) dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Interprétation des résultats des analyses physico-chimiques

La stabilité thermique observée est caractéristique des eaux souterraines en milieu tropical et n'a pas d'impact direct sur leur potabilité (WHO, 2017). L'acidité du pH résulte de la décomposition de la matière organique et de la nature géochimique des sols tropicaux de Kisangani (Dabin, 1984 ; Ngongo *et al.*, 2009).

Les conductivités modérées traduisent une faible minéralisation, ce qui confirme qu'il n'y a pas de salinisation significative. La forte turbidité relevée dans certains puits traduit leur vulnérabilité aux infiltrations d'eaux de ruissellement et à l'insuffisance des mesures de protection sanitaire.

Les concentrations en nitrates et nitrites, bien que respectant les normes, indiquent une influence anthropique modérée. Les dépassements observés pour le fer seraient probablement liés à la nature géologique des formations aquifères et aux conditions réductrices du milieu.

En général, la qualité physico-chimique des forages est meilleure que celle des puits, grâce certainement à leur profondeur et à leur meilleure protection contre les contaminations de surface.

Résultats des tests microbiologiques

Les analyses microbiologiques montrent que les eaux étudiées sont très contaminées (Tableau 4).

Tableau 4 : Résultats des analyses microbiologiques des eaux de Puits et de Forages de Makiso exprimés en moyenne \pm écart-type selon les saisons

Paramètre	Unité	Saison pluvieuse (Moy \pm ET)	Saison sèche (Moy \pm ET)	p-value	Normes OMS	Conformité
Germes totaux (GT)	UFC/100 ml	7856,6 \pm 7008,05	7706,6 \pm 6448,84	0,93	0	Non conforme
Coliformes totaux (CT)	UFC/100 ml	1520 \pm 3637,67	3193,3 \pm 5871,14	0,19	0	Non conforme
Escherichia coli (E coli)	UFC/100 ml	0 \pm 0	3,33 \pm 18,25	0,32	0	Valeurs supérieures aux normes en saison sèche
Coliformes fécaux (CF)	–	136,66 \pm 252,55 UFC/100 ml	50,56 \pm 254,96 NPP/100 ml	0,19	0	Non conforme
Streptocoques fécaux (SF)	–	0 \pm 0 UFC/100 ml	202,26 \pm 365,30 NPP/100 ml	0,005	0	Valeurs supérieures aux normes en saison sèche
Salmonella spp.	UFC/100 ml	63,33 \pm 184,73	260 \pm 634,41	0,112	0	Non conforme

Les valeurs sont exprimées en moyenne (Moy) \pm écart-type (ET). Les p-values correspondent au test t de Student comparant les paramètres microbiologiques entre les saisons pluvieuse et sèche. Les différences sont considérées statistiquement significatives pour $p < 0,05$. Les coliformes fécaux (CF) et les streptocoques fécaux (SF) de la saison sèche ont été déterminés par la méthode du Nombre le Plus Probable (NPP) à trois tubes par série, tandis que les autres paramètres microbiologiques ont été exprimés en UFC/100 ml.

Germes totaux

Les germes totaux (Figure 14) atteignent des taux très élevés, dépassant 20 000 UFC/100 mL dans certains échantillons.

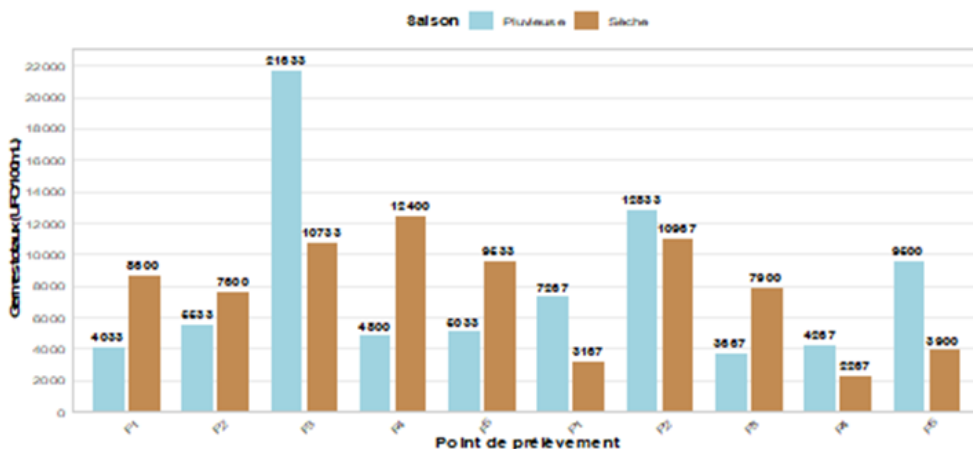


Figure 14 : Répartition des germes totaux dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Coliformes totaux

Les coliformes totaux sont détectés dans la plupart des points de prélèvement, à des concentrations largement au-dessus de la norme de 0 UFC/100 mL (Figure 15).

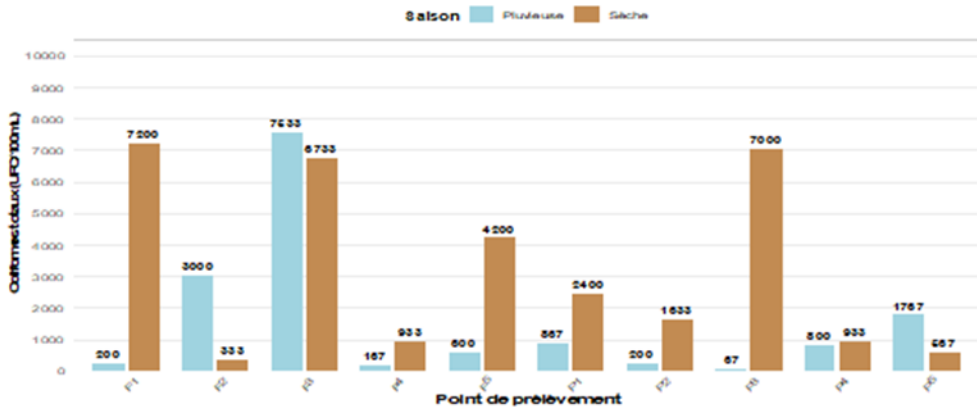


Figure 15 : Distribution des coliformes totaux dans les puits (P) et forages (F)

Escherichia coli

La présence d'E. coli est observée au point P2 durant la saison sèche (33 UFC/100 mL), ce qui montre une contamination fécale récente (Figure 16).

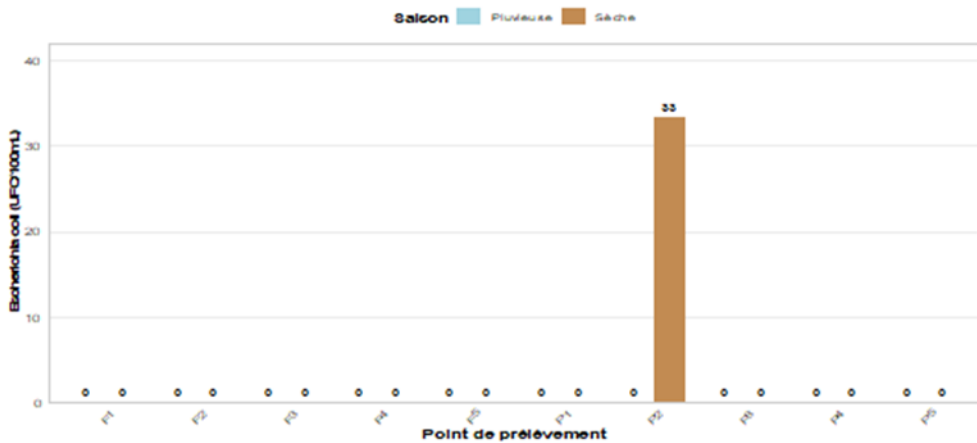


Figure 16 : Présence d'Escherichia coli dans les eaux puits (P) et forages (F) étudiées

Coliformes fécaux (CF)

Les coliformes fécaux présentent des concentrations élevées, notamment 567 UFC/100 mL au point P5 en saison pluvieuse et 476 UFC/100 mL au point P2 en saison sèche (Figure 17).

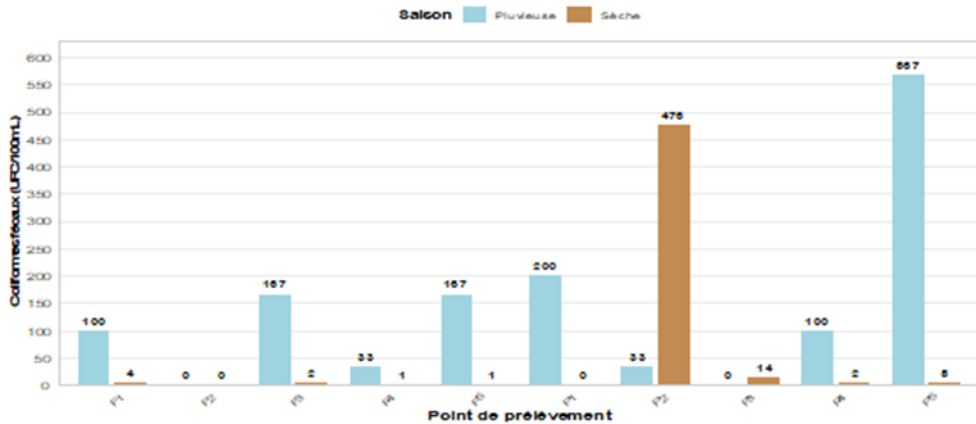


Figure 17 : Variation des coliformes fécaux dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Streptocoques fécaux (SF)

Les streptocoques fécaux sont principalement détectés en saison sèche, avec des valeurs atteignant 440 UFC/100 mL (F1) et 438 UFC/100 mL (P1) (Figure 18).

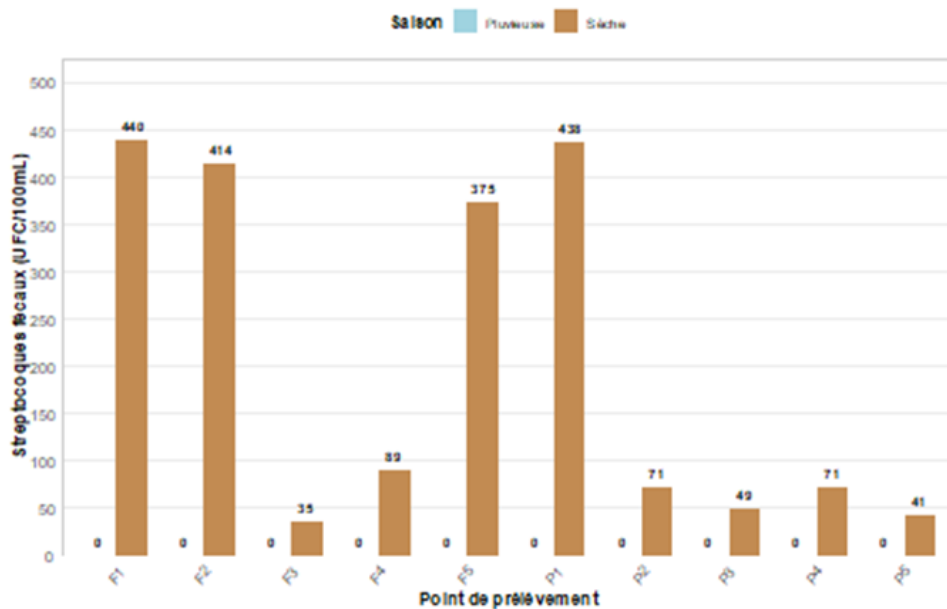


Figure 18 : Distribution des streptocoques fécaux dans les eaux de puits (P) et forages (F) étudiées

Salmonella spp. (SS)

La présence de bactéries du groupe *Salmonella spp* dans plusieurs puits, avec des concentrations allant jusqu'à 500 UFC/100 mL, met en évidence un risque sanitaire important pour les populations consommatrices (Figure 19).

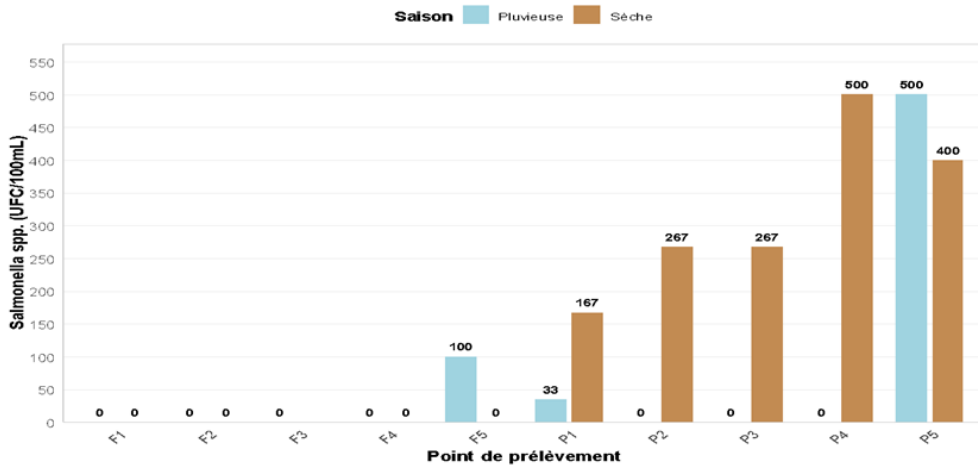


Figure 19 : Présence de *Salmonella spp.* dans les eaux de puits (P) et de forages (F)

Interprétation des résultats des analyses microbiologiques

La présence généralisée de coliformes totaux, de coliformes fécaux et de streptocoques fécaux témoigne d'une contamination d'origine fécale des ressources en eau. Selon les directives de l'OMS, l'absence totale d'E. coli et de coliformes fécaux est exigée pour garantir la potabilité de l'eau (WHO, 2017).

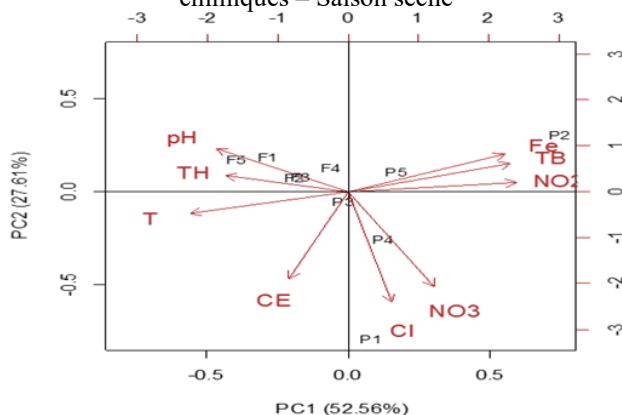
La contamination plus marquée des puits s'explique par leur faible profondeur, leur proximité avec les latrines et l'absence de dispositifs de protection adéquats. L'augmentation des charges bactériennes en saison pluvieuse est liée au lessivage des sols et au transport des contaminants vers les nappes superficielles.

La présence de *Salmonella spp.* constitue un indicateur de pollution fécale sévère et expose les populations à des maladies hydriques telles que la typhoïde et la dysenterie.

Contribution des paramètres et des points d'eaux dans les composantes principales

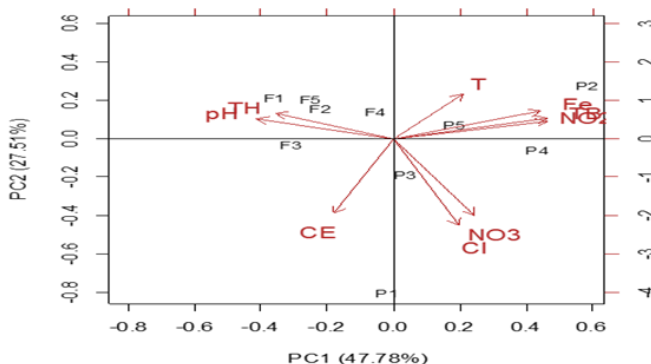
Les résultats indiqués dans les figures 20 et 21 montrent les contributions saisonnières des paramètres physico-chimiques des eaux (Puits et Forages).

Figure 20 : Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques – Saison sèche



CE : Conductivité électrique ; T : Température ; TB : Turbidité ; TH : Dureté totale ; Fe : Fer total ; NO3 : Nitrates ; NO2 : Nitrites ; Cl : ions chlorures.

Figure 21 : Biplot de l'ACP des paramètres physico-chimiques – Saison pluvieuse



CE : Conductivité électrique ; T : Température ; TB : Turbidité ; TH : Dureté totale ; Fe : Fer total ; NO3 : Nitrates ; NO2 : Nitrites ; Cl : ions chlorures.

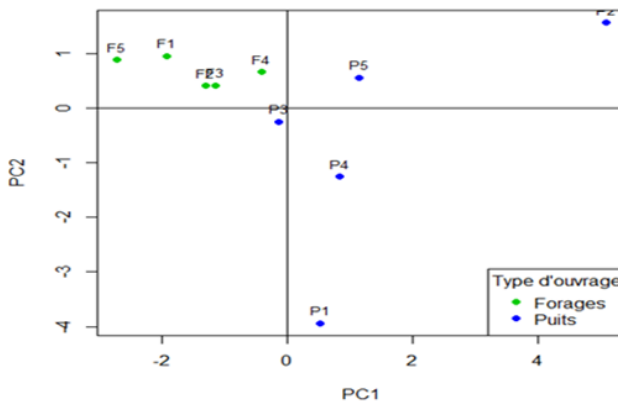


Figure 22 : Projection des points de prélèvement sur le plan factoriel de l'ACP – Saison sèche

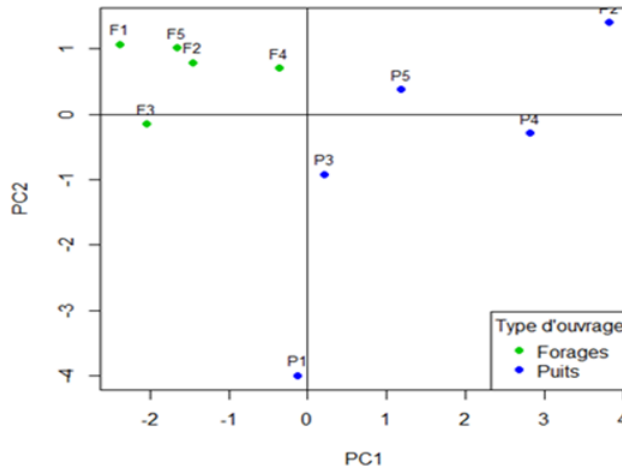


Figure 23 : Projection des points de prélèvement sur le plan factoriel de l'ACP – Saison pluvieuse

Interprétation de contribution des paramètres et des points d'eaux dans les composantes principales :

Les résultats des Analyses en Composantes Principales (ACP) présentés aux Figures 20 à 23 mettent en évidence une structuration des variables autour de deux axes factoriels principaux. En saison sèche, les axes PC1 et PC2 expliquaient respectivement 52,56 % et 27,61 % de la variance totale, tandis qu'en saison pluvieuse ils représentaient respectivement 47,78 % et 27,51% de l'inertie totale.

Au cours des deux saisons, l'axe principal (PC1) oppose :

- D'une part, les paramètres de minéralisation et de contamination tels que la conductivité électrique (CE), les nitrates (NO_3^-), les ions chlorures (Cl^-), ainsi que la turbidité (TB), les nitrites (NO_2^-) et le fer (Fe),
- D'autre part, les paramètres tels que le pH, la dureté totale (TH) et la température (T).

La turbidité (TB) renforce nettement le pôle de contamination, notamment lorsqu'elle est associée à Fe, NO_2^- , traduisant une influence combinée des matières en suspension et des processus de pollution.

En saison sèche, P1, P4 et P5 sont plus liés aux paramètres de minéralisation (CE, NO_3^- , Cl^-), alors que P2 se distingue par une forte association avec TB, Fe et NO_2^- , suggérant une contamination localisée.

Au cours de la saison des pluies, cette structuration est d'autant plus marquée que :

- Les variables TB, Fe, NO_2^- et T se regroupent nettement, traduisant l'effet du ruissellement et de la remise en suspension des particules,
- Alors que CE, NO_3^- et Cl^- restent liés à la minéralisation.

Les forages (F1 - F5) s'assemblent globalement du côté des paramètres stables (pH, TH), alors que les puits présentent une dispersion plus importante, traduisant leur vulnérabilité aux influences extérieures.

Groupement hiérarchique suivant la similarité entre les paramètres physico-chimiques

Les résultats indiqués (Figures 24 et 25) montrent deux groupes le long des saisons.

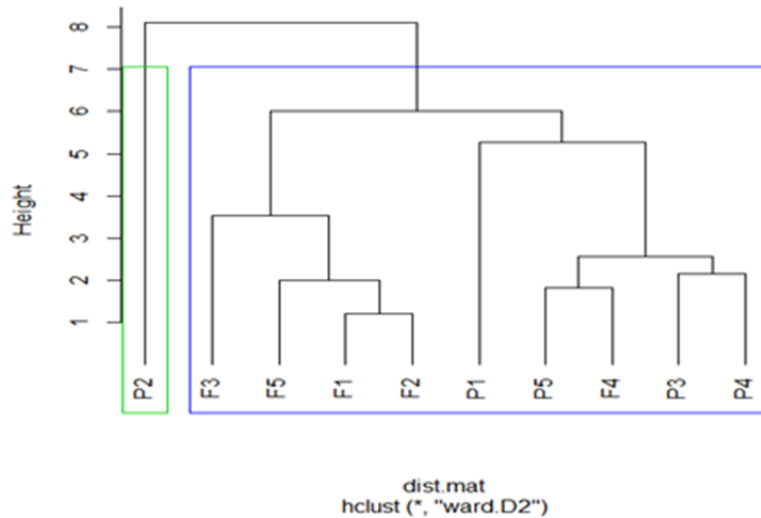


Figure 24 : Dendrogramme de classification hiérarchique des eaux de puits et de forages (Saison sèche)

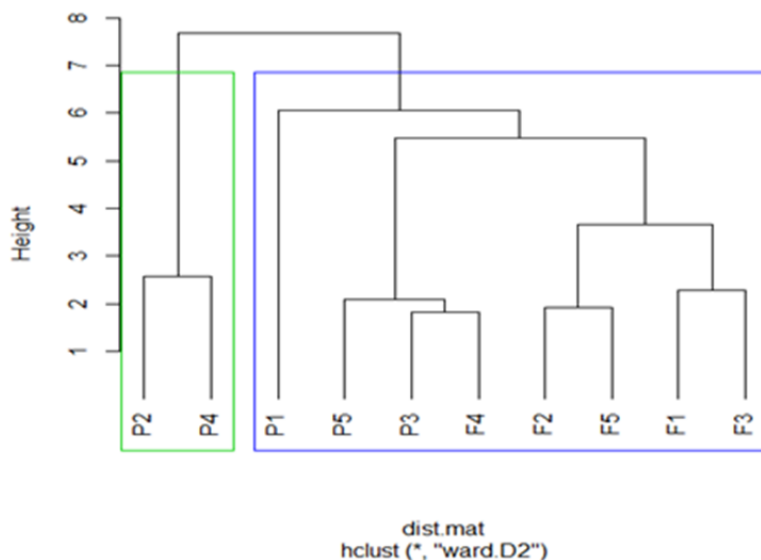


Figure 25 : Dendrogramme de classification hiérarchique (Saison pluvieuse)

Les figures 24 et 25 ont présenté des groupes similaires aux contributions factoriels (Figure 20 – 23).

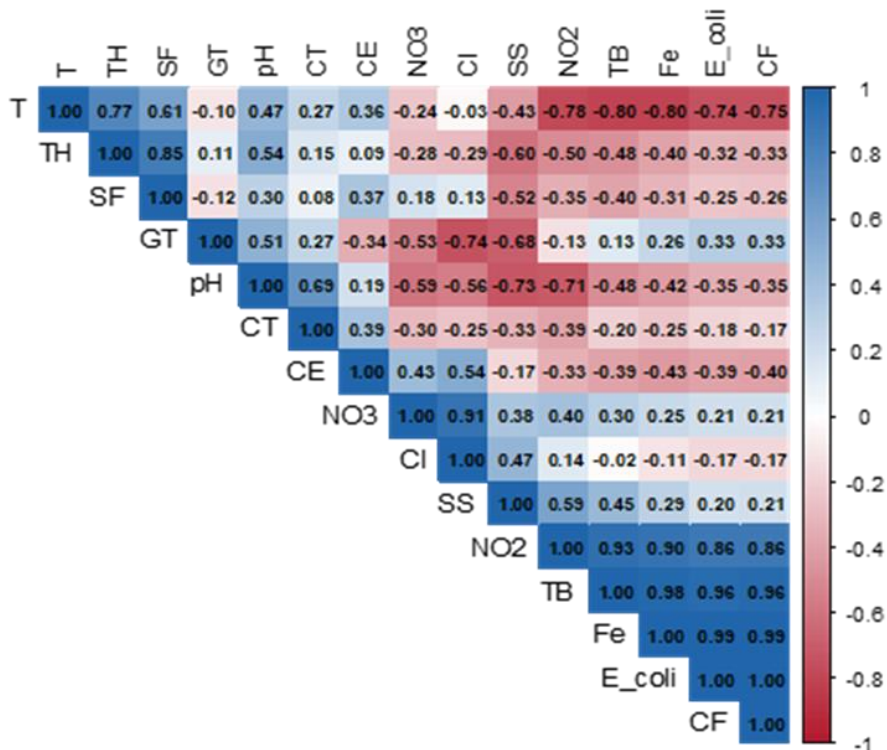
Pendant la saison sèche :

- Un groupe isolé (P2) se distingue nettement par des teneurs élevées en turbidité, fer et nitrites, traduisant une contamination spécifique,
- Les autres points se regroupent en un ensemble relativement homogène.
- Pendant la saison des pluies, on distingue deux groupes principaux :
- L'un regroupant P2 et P4, influencé par les paramètres de contamination,
- Le second groupe comprenant la majorité des forages.

Cette classification montre une différenciation plus marquée en saison pluvieuse, liée à l'effet des précipitations qui accentuent les phénomènes de contamination.

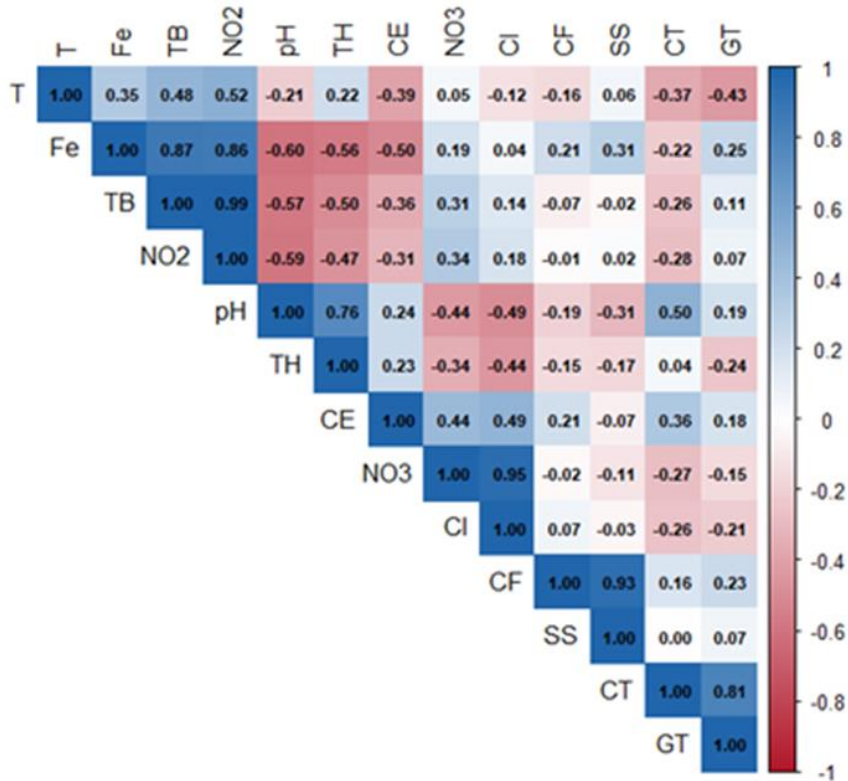
Corrélations de Pearson

Figure 26 : Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimiques et microbiologiques (Saison sèche)



CE : Conductivité électrique ; T : Température ; TB : Turbidité ; TH : Dureté totale ; Fe : Fer total ; NO3 : Nitrates ; NO2 : Nitrites ; Cl : Chlorures ; GT : Germes totaux ; CT : Coliformes totaux ; CF : Coliformes fécaux ; SF : Streptocoques fécaux ; SS : Salmonella spp. ; E_coli : Escherichia coli.

Figure 27 : Matrice de corrélation de Pearson (Saison pluvieuse)



CE : Conductivité électrique ; T : Température ; TB : Turbidité ; TH : Dureté totale ; Fe : Fer total ; NO3 : Nitrates ; NO2 : Nitrites ; Cl : Chlorures ; GT : Germes totaux ; CT : Coliformes totaux ; CF : Coliformes fécaux ; SS : Salmonella spp.

Les matrices de corrélation de Pearson confirment globalement les tendances observées dans les analyses en composantes principales. Des corrélations positives modérées ont été observées entre la turbidité (TB ; $r = 0,45$), le fer total (Fe ; $r = 0,29$), les nitrites (NO_2^- ; $r = 0,59$) et certains paramètres microbiologiques, ce qui pourrait traduire une relation entre les matières en suspension et la contamination microbiologique des eaux. De même, l'association observée entre la conductivité électrique (CE ; $r = 0,54$), les nitrates (NO_3^- ; $r = 0,91$) et les ions chlorures (Cl^-) pourrait refléter l'influence des processus de minéralisation des eaux souterraines.

Des corrélations négatives ont également été observées entre le pH et certains paramètres de contamination tels que les nitrites (NO_2^- ; $r = -0,59$), la turbidité (TB ; $r = -0,57$) et le fer total (Fe ; $r = -0,60$), suggérant qu'une acidité plus élevée pourrait influencer certaines caractéristiques physico-chimiques des eaux étudiées.

Les fortes corrélations positives observées entre certains indicateurs microbiologiques, notamment les coliformes totaux (CT), les coliformes

fécaux (CF), *Salmonella spp.* (SS) et les germes totaux (GT), traduisent une évolution relativement similaire de ces paramètres dans les eaux étudiées.

Par ailleurs, certaines variables microbiologiques telles qu'*Escherichia coli* et les streptocoques fécaux (SF) ont été exclues de la matrice de corrélation de la saison pluvieuse en raison d'une variance nulle observée dans les données, toutes les valeurs enregistrées étant égales à zéro pour ces paramètres durant cette période. Cette situation a limité leur prise en compte dans certaines analyses statistiques réalisées sous le logiciel R.

Discussion

Les résultats obtenus dans la présente étude s'inscrivent globalement dans la dynamique des travaux menés en Afrique subsaharienne sur la qualité des eaux souterraines. La stabilité de la température observée est caractéristique des eaux souterraines en milieu tropical humide comme Kisangani et concorde avec les résultats rapportés par Ahoussi et al. (2018) en Côte d'Ivoire, Chapman (1996) dans les études sur les eaux tropicales ainsi que les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2017). L'acidité observée dans plusieurs échantillons ($\text{pH} < 6,5$) est cohérente avec les études réalisées en République Démocratique du Congo en Côte d'Ivoire et au Maroc (Ahoussi, 2018 ; Haissoufi et al., 2011; Nzomba, 2023), qui attribuent ce phénomène à la nature géochimique des sols tropicaux ainsi qu'à la minéralisation de la matière organique. Cette acidité peut aussi favoriser la solubilisation de certains métaux dont le fer, ce qui expliquerait les concentrations élevées observées dans certains puits. Des observations similaires ont été rapportées par Kyowire Kambali et al. (2016) dans les eaux souterraines de Kinshasa.

Les valeurs de conductivité électrique (CE) observées dans cette étude restent relativement faibles à modérées et largement inférieures à la limite recommandée par l'OMS (1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), traduisant une faible à moyenne minéralisation des eaux. Ces résultats sont comparables à ceux observés par Ako et al. (2011) au Cameroun ainsi que par Ahoussi et al. (2018) en Côte d'Ivoire. Toutefois, ces valeurs demeurent nettement inférieures à celles observées dans les eaux souterraines du sud du Marais Poitevin en France, où une forte minéralisation a été attribuée au substratum carbonaté et aux processus de dissolution géochimique (Anongba et al., 2023). Ces différences reflètent probablement l'influence des conditions géologiques, hydrogéochimiques et environnementales propres à chaque zone d'étude. Cette minéralisation semble principalement contrôlée par les interactions eau-roche et les processus de dissolution minérale, comme le suggère l'association observée entre la conductivité électrique, les nitrates et les ions chlorures dans les analyses multivariées. Par ailleurs, les faibles concentrations en nitrates

relevées dans plusieurs échantillons pourraient indiquer une influence anthropique relativement modérée dans certaines zones étudiées.

L'utilisation des analyses multivariées constitue un apport important de cette étude dans la compréhension des mécanismes contrôlant la qualité des eaux souterraines de Makiso. Les résultats des Analyses en Composantes Principales (ACP) ont montré une structuration des paramètres physico-chimiques autour de deux axes factoriels principaux. En saison sèche, les axes PC1 et PC2 expliquaient respectivement 52,56 % et 27,61 % de la variance totale, soit une inertie cumulée de 80,17 %. En saison pluvieuse, les axes PC1 et PC2 représentaient respectivement 47,78 % et 27,51 % de l'inertie totale, soit 75,29 % de la variance expliquée. Ces valeurs traduisent une bonne représentation statistique des relations entre les variables étudiées.

Les ACP mettent en évidence une opposition nette entre deux groupes de variables : d'une part, les paramètres liés à la minéralisation naturelle des eaux (CE , NO_3^- et Cl^-) et, d'autre part, ceux associés aux phénomènes de contamination (TB , Fe et NO_2^-). L'inclusion de la turbidité (TB) dans l'analyse a permis de mieux structurer ce second groupe, confirmant son rôle d'indicateur de dégradation de la qualité des eaux. La proximité observée entre la turbidité, le fer et les nitrites suggère une influence combinée des matières en suspension, du ruissellement et des apports anthropiques.

Cette relation s'explique par le fait que les particules en suspension constituent un support pour les micro-organismes et facilitent leur transport dans le milieu aquatique. Ainsi, la corrélation observée entre la turbidité et les paramètres microbiologiques confirme que la turbidité n'est pas seulement un paramètre esthétique, mais un indicateur indirect de contamination microbiologique, comme l'ont également montré Howard et Pierre Chevalier et les membres du Groupe scientifique sur l'eau de l'Institut national de santé publique du Québec (Howard, 2003 ; Chevalier, 2003).

Les matrices de corrélation de Pearson ont globalement confirmé les tendances mises en évidence par l'ACP. Les fortes corrélations positives observées entre certains paramètres microbiologiques traduisent probablement une origine commune de contamination. De même, les relations positives entre CE , NO_3^- et Cl^- renforcent l'hypothèse d'une influence géochimique et minérale des eaux souterraines. Toutefois, l'interprétation de certaines corrélations doit être réalisée avec prudence, certaines variables microbiologiques présentant une variance nulle ayant été exclues automatiquement de certaines analyses statistiques par le logiciel R.

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) renforce ces observations en mettant en évidence une structuration des points d'échantillonnage selon leur degré de contamination. L'isolement du point P2, caractérisé par des valeurs élevées en turbidité, en fer et en nitrites, suggère

l'existence d'une source ponctuelle de pollution, possiblement liée à des activités anthropiques ou à un défaut de protection de l'ouvrage.

Par ailleurs, l'effet saisonnier apparaît clairement dans l'ensemble des analyses réalisées. En saison pluvieuse, la dispersion des points et le renforcement du groupe de variables liées à la contamination reflètent l'influence du ruissellement et de l'infiltration des eaux de surface, qui favorisent l'introduction de contaminants dans les nappes superficielles. Ces observations corroborent les travaux de Shrestha et al. (2007), qui ont mis en évidence l'importance des facteurs climatiques dans la variabilité de la qualité des eaux.

Les résultats microbiologiques confirment cette tendance, en montrant une contamination relativement importante des eaux, particulièrement au niveau des puits. Ces observations corroborent les travaux de Howard et al. (2003), selon lesquels les ouvrages peu protégés restent fortement vulnérables aux contaminations fécales et aux infiltrations de surface. Des études réalisées en RDC, notamment par Bisimwa et al. (2022) et Nathan et al. (2023), ont également rapporté une dégradation microbiologique importante des eaux souterraines utilisées pour la consommation humaine.

Toutefois, il faut tenir compte de certaines limites dans l'interprétation des résultats. La taille de l'échantillonnage, bien que représentative, reste limitée, et les analyses ont été menées sur un nombre restreint de campagnes. Par ailleurs, l'absence de certains paramètres (ex. métaux lourds ou pesticides) ne permet pas d'avoir une vision exhaustive de la qualité de l'eau.

Malgré ces limites, les résultats mettent en évidence une vulnérabilité plus importante des puits comparativement aux forages, ainsi que le rôle des facteurs environnementaux et anthropiques dans la dégradation de la qualité des eaux souterraines de la commune Makiso. Ces résultats soulignent l'importance du suivi régulier de la qualité des eaux et du renforcement des mesures de protection sanitaire des ouvrages hydrauliques en milieu urbain tropical.

Conclusion et suggestions

Cette étude a permis d'évaluer de façon comparative la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages dans la commune de Makiso, en intégrant l'effet des variations saisonnières.

Les résultats physico-chimiques montrent que, bien que plusieurs paramètres soient globalement conformes aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), certaines anomalies persistent, notamment en ce qui concerne le pH, la turbidité et les concentrations en fer total. Les eaux étudiées présentent globalement un caractère acide avec des

valeurs de pH inférieures aux normes recommandées de l’OMS. Les analyses statistiques ont révélé des différences significatives entre les deux saisons pour la température ($p = 0,013$), le pH ($p = 0,005$) et la dureté totale ($p < 0,001$), traduisant l’influence des variations saisonnières sur certains paramètres physico-chimiques. La turbidité s’est révélée être un paramètre central, fortement corrélé aux indicateurs microbiologiques, mettant en évidence son rôle dans le transport et la persistance des micro-organismes dans l’eau.

Sur le plan microbiologique, les résultats sont préoccupants, avec une contamination généralisée des eaux par des indicateurs de pollution fécale, rendant la majorité des échantillons non conformes aux normes de potabilité. Cette contamination est plus marquée dans les puits et s’accroît en saison pluvieuse, en raison des apports liés au ruissellement.

Les forages présentent une qualité relativement meilleure, confirmant leur moindre vulnérabilité, bien que certains cas de contamination aient été observés. Au regard de ces résultats, il apparaît nécessaire de :

- Renforcer la protection sanitaire des ouvrages, notamment les puits,
- Sensibiliser les populations aux pratiques d’hygiène et de traitement de l’eau,
- Mettre en place un système de suivi régulier de la qualité des eaux,
- Approfondir les recherches en intégrant d’autres paramètres de pollution.

En définitive, cette étude met en évidence l’importance d’une approche intégrée combinant analyses physico-chimiques, microbiologiques et statistiques pour une meilleure compréhension de la qualité des ressources en eau en milieu urbain tropical.

Conflit d’intérêts : Les auteurs n’ont signalé aucun conflit d’intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l’article.

Déclaration de financement : Ces travaux ont été soutenus par le programme de mobilité académique INTERACT-Africa, cofinancé par l’Union européenne dans le cadre du projet « Mobilité dans les technologies vertes innovantes pour l’atténuation du changement climatique et la bio-économie durable » (Projet INTERACT-Africa-101144299).

References:

1. Action contre la Faim (ACF). (2009). *Évaluation eau, assainissement et hygiène à Kisangani*. <https://reliefweb.int/report/democratic-republic-congo/évaluation-eau-assainissement-et-hygiène-ville-de-kisangani>

2. Ahoussi, E. K., Keumean, N. K., Kouassi, M. A., & Koffi, B. Y. (2018). Etude des caractéristiques hydrogéochimiques et microbiologiques des eaux de consommation de la zone périurbaine de la ville de Man: cas du village de Kpangouin (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(6), 3018–3033. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i6.37>
3. Ako, A. A., Shimada, J., Hosono, T., Ichiyanagi, K., Nkeng, G. E., Fantong, W. Y., Eyong, G. E., & Roger, N. N. (2011). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking, domestic, and agricultural uses in the Banana Plain (Mbanga, Njombe, Penja) of the Cameroon Volcanic Line. *Environmental geochemistry and health*, 33(6), 559–575. <https://doi.org/10.1007/s10653-010-9371-1>
4. Anongba Braphond Rodrigue, V. B., Privat, T., Issa, S. S., & Germain, A. M. (2023). Origine et Processus de Minéralisation des Eaux Souterraines dans la Partie sud du Marais Poitevin (Poitou-Charentes France) et de Son Substratum Carbonaté de l'Oxfordien Supérieur. *European Scientific Journal, ESJ*, 21, 533. Retrieved from <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/17217>
5. Bennasser, L. (1997). *Diagnostic de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb* (Thèse de doctorat).
6. Bisimwa, A. M., Bashwira, S., Muhigirwa, B., & Bisimwa, G. (2022). Water quality assessment in Bukavu. *Environmental and Sustainability Indicators*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100183>
7. Chapman, D. V. (1996). *Water quality assessments*. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/41850>
8. Chevalier, P. (2003). *Turbidité et qualité de l'eau potable*. Institut national de santé publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/turbidite>
9. Dabin, B. (1984). *Les sols tropicaux acides*. O.R.S.T.O.M.
10. Degbey, C., Makoutode, M., Ouendo, E. M., & De Brouwer, C. (2010). Pollution physico-chimique et microbiologique de l'eau des puits dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(6), 2257–2271.
11. Haissoufi, H., Berrada, S., Merzouki, M., Aabouch, M., Bennani, L., Benlemlih, M., Idir, M., Zanibou, A., Bennis, Y., & El Ouali Lalami, A. (2011). Pollution des eaux de puits de certains quartiers de la ville de Fès, Maroc. *Revue de Microbiologie Industrielle Sanitaire et Environnementale*, 5, 37–68.
12. Howard, G., Pedley, S., Barrett, M., Nalubega, M., & Johal, K. (2003). Risk factors contributing to microbiological contamination of shallow

- groundwater in Kampala, Uganda. *Water Research*, 37, 3421–3429. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00235-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00235-5)
13. International Organization for Standardization. (1988). *ISO 8199: Water quality—General guide to the enumeration of microorganisms*.
 14. Kyowire Kambali, P., Luamba Lua Nsembo, J., Kamb Tshijik, J. C., Sisa Mbungu, E., Gikug Munganga, J., & Bunda Pata Mayala, N. (2016). Caractéristiques physico-chimiques et teneurs en éléments traces métalliques des eaux de puits et forages à Kinshasa (RDC). *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*. <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v47.2.672>
 15. Maoudombaye, T., Ndoutamia, G., Seid Ali, M., & Ngakou, A. (2015). Étude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits, de forages et de rivières consommées dans le bassin pétrolier de Doba au Tchad. *Larhyss Journal*, 24, 193–208.
 16. Nathan, I. S., Lambert, I. S., Judith, M. S., Sylvie, N. A., & Alice, B. M. (2023). Qualité des eaux des sources utilisées pour la consommation dans la ville de Kisangani. *IJRDO Journal of Applied Science*, 9(7), 14–26. <https://doi.org/10.53555/as.v9i7.5793>
 17. Ngongo, M., Van Ranst, E., Baert, G., Kasongo Lenge, E., Verdoodt, A., Mujinya, B. B., & Munkalay, J. (2009). *Guide des sols en République Démocratique du Congo : Tome I. Étude et gestion*. UGent & UNILU.
 18. Nzomba, D. (2023). *Hydrogéochimie et contamination des eaux souterraines à Kinshasa*. <http://www.afriquescience.net/>
 19. Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (2011). *Problématique de l'eau en République Démocratique du Congo : Défis et opportunités*. https://bdd.pseau.org/outils/ouvrages/pnue_problematique_de_l_eau_en_republique_democratique_du_congo_2011.pdf
 20. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd.). Paris : Dunod.
 21. Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques. *Environmental Modelling & Software*, 22, 464–475. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001>
 22. UN-Habitat. (2026). *Rapport ville de Kisangani*. Consulté le 18 avril 2026 sur <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-file/RAPPORT%20%20VILLE%20KISANGANI.pdf>
 23. University of Batna 2. (2026). *Microbiologie de l'eau*. Consulté le 19 février 2026 sur https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/zerroug-mohamed-mihoub/files/chapitre_2_microbiologie_de_leau.pdf

24. World Bank. (2019). *Projet d'appui à la réhabilitation de Kisangani*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/214311548930183954/pdf/PAR-Bld-30Juin-KISANGANI-Jan-2019.pdf>
25. World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.